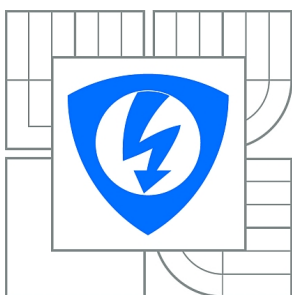




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI POMOCÍ TECHNOLOGIE ZIGBEE

DISTANCE MEASUREMENT BY ZIGBEE TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JOSEF ČEPL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL HANÁK

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Josef Čepl

ID: 78540

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Měření vzdálenosti pomocí technologie ZigBee

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte možnosti hrubého měření vzdálenosti dvou ZigBee modulů na základě síly přijímaného signálu. Při řešení použijte vývojový kit Freescale 1321XDSK-BDM/FSL, ke kterému jste v rámci semestrálního projektu vytvořil uživatelské rozhraní. Navrhněte program, který bude číst informace o síle signálu z patřičných registrů, převede je na vzdálenost a zobrazí. Prozkoumejte vliv natočení modulů, okolního prostředí, blízkosti cizích předmětů apod. na přesnost měření vzdálenosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Farahani, S. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Newnes, London, 2008. ISBN 0750683937

[2] Qian K., Haring D., Cao L. Embedded Software Development with C. Springer, New York, 2009. ISBN 1441906053

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hanák

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou hrubého zjišťování vzdálenosti mezi dvěma bezdrátovými moduly založenými na standardu ZigBee. V prvním logickém celku se věnuje teoretickému popisu výše uvedené technologie a jejím charakteristikám. Tato část podává čtenáři základní informace nutné pro pochopení fungování bezdrátové komunikace a seznamuje jej také s některými pojmy z tohoto odvětví. Následuje popsání metody přístupu ke sdílenému médiu spolu s podrobným popisem funkcí, které jsou stěžejní pro určení intenzity signálu. Druhá část se věnuje popisu vývojového kitu 1321XDSK-BDM. Další část je již určena pro návrh uživatelského rozhraní pro zobrazení měřených dat. Je zde popsána počáteční vize zařízení doplněná o řešení komunikace bezdrátového modulu s navrhovaným zařízením. Dále je zde návrh zapojení v programu Eagle a vysvětlení funkce jednotlivých součástek v zapojení. V posledních dvou kapitolách logického celku je popsána konstrukce zařízení a stručný návod k jeho použití. Následuje část, která popisuje výběr vhodné aplikace, nutné změny kódu a implementaci vlastního kódu spolu s popisem důležitých funkcí a částí programu. Předposlední kapitola obsahuje měření dat v terénu s použitím bezdrátových modulů a navrženého zobrazovacího modulu. Testují se zde různé vlivy na konečnou přesnost měření vzdálenosti. V závěru je provedena diskuze nad dosaženými výsledky. Zejména tato část obsahuje posouzení přesnosti měřicí metody a zhodnocuje použitelnost metody v praxi.

Klíčová slova: ZigBee, měření vzdálenosti, intenzita signálu, LQI, CCA, Freescale 1321XDSK-BDM, Freescale BeeKit, CodeWarrior IDE

ABSTRACT

The master's thesis deals with problems which is associated with rough detection of distance between wireless modules based on ZigBee technology. In the first logical part it theoretically describes this technology and their characteristics. This section gives basic informations needed to understand the operation of wireless communications and also acquaint him with some of the terms from this sphere. Next thing is description of the medium access together with a detailed description of functions that are crucial for determining the signal strength. The second part is devoted to describe the 1321XDSK-BDM development kit. Another section is devoted to the design of the user's interface for displaying measured data. It consists of a theoretical design, which describes the initial vision of the device accompanied by solution of communication between wireless module and the proposed device. Follows the design of the involvement in Eagle software and explanation of the various components. In the last two chapters of the whole logical structure is described construction of the device and simple user's guide. The following chapter talks about the selection of suited application, necessary changes and own implementation of source code. There is even a description of important features and components of the application. The penultimate chapter contains a distance measurement in terrain using wireless modules and designed device. Here are tested different influences on the final distance measurement accuracy. In conclusion there is a debate over the results achieved. Particular, this section includes an assessment of precision measuring methods and evaluates aplicability of this method in practice.

Keywords: ZigBee, distance measurement, signal strength, LQI, CCA, Freescale 1321XDSK BDM, Freescale BeeKit, CodeWarrior IDE

Bibliografická citace mé práce:

ČEPL, J. *Měření vzdálenosti pomocí technologie ZigBee*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Hanák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „Měření vzdálenosti pomocí technologie ZigBee“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Hanákovi za metodickou pomoc a cenné rady při řešení samotné práce. Dále děkuji rodinným příslušníkům za podporu v dosavadním průběhu studia a asistenci při měření dat v terénu.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1 Technologie Zigbee	13
1.1 Charakteristika technologie	13
1.2 Struktura komunikačního standardu	14
1.3 Topologie ZigBee	16
1.3.1 Beacon enabled a non-beacon sítě	18
1.4 Úkoly zařízení v síti	19
1.5 Adresování	19
2 Metoda CCA	21
2.1 Energy Detection	22
2.2 Carrier Sense	22
2.3 Link Quality Indicator	23
2.4 CCA Módy zahrnující LQI	23
2.4.1 Funkce Clear Channel Assessment	24
2.4.2 Funkce Energy Detect	25
3 Vývojový kit Freescale 1321XDSK – BDM	27
3.1 Vývojový kit	27
3.2 Deska 13213 – SRB	28
3.3 Transceiver MC13213	30
3.3.1 RF modem	30
3.3.2 MCU jednotka	31
4 Zobrazovací modul	32
4.1 Podoba zařízení	32
4.2 Volba ovládacích pinů	33
4.3 Návrh	34
4.4 Popis a funkce jednotlivých bloků	34
4.4.1 LCD displej	34
4.4.2 Napájecí blok	35
4.4.3 Lišty a konektory	36
4.5 Konstrukce	36
4.6 Pokyny k užívání	38
4.6.1 Napájení	38
4.6.2 Instalace bezdrátového modulu	39
4.6.3 Programování	40
5 Aplikace	41
5.1 Výběr programu	41
5.1.1 Chování původního programu	41
5.2 Modifikace kódu	42
5.3 Význam některých funkcí a proměnných	44

6 Měření	48
6.1 Uvnitř objektu	48
6.1.1 Měření vzdálenosti	48
6.2 Ve volném terénu	51
6.2.1 Vliv vzájemného natočení modulů.....	51
6.2.2 Měření vzdálenosti	56
6.2.3 Vliv výšky na měření	59
Závěr.....	60
Literatura	61
Seznam použitých zkratk.....	63
Seznam příloh.....	65

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Struktura referenčního modelu ZigBee 1.0.....	15
Obr. 1.2: Topologie sítě „hvězda“.....	16
Obr. 1.3: Topologie sítě „strom“.....	17
Obr. 1.4: Topologie sítě „sít“ („mesh“).	17
Obr. 1.5: Rozdíly mezi názvy ve standardu 802.15.4 a ZigBee.....	19
Obr. 3.1: Blokový diagram desky 13213 – SRB.....	28
Obr. 3.2: Fotografie desky 13213 – SRB.....	29
Obr. 4.1: Zjednodušený náčrt zařízení.....	32
Obr. 4.2: Schéma zobrazovací části a konektorů.	34
Obr. 4.3: Schéma zdroje.....	35
Obr. 4.4: Zobrazovací modul.	37
Obr. 4.5: Zobrazovací modul spolu se ZigBee modulem.	39
Obr. 4.6: Programování ZigBee modulu.....	39
Obr. 6.1: Náčrt měřicí metody (měření vzdálenosti, pohled ze strany).....	48
Obr. 6.2: Graf závislosti změřené úrovně signálu na vzdálenosti uvnitř obytné místnosti.....	49
Obr. 6.3: Graf závislosti změřené úrovně signálu na vzdálenosti uvnitř garáže.....	50
Obr. 6.4: Měření vlivu vzájemného natočení modulů metodou 1 (pohled seshora).	51
Obr. 6.5: Měření vlivu vzájemného natočení modulů metodou 2 (pohled seshora).	52
Obr. 6.6: Graf změřených hodnot při vzájemném natočení modulů – metoda 1.	53
Obr. 6.7: Graf změřených hodnot při vzájemném natočení modulů – metoda 2.	53
Obr. 6.8: Měření vlivu vzájemného natočení modulů metodou 3 (pohled seshora).	54
Obr. 6.9: Graf změřených hodnot při vzájemném natočení modulů – metoda 3.	55
Obr. 6.10: Graf závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (1).	56
Obr. 6.11: Graf závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (2).	57
Obr. 6.12: Graf závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (3).	58

Seznam tabulek

Tab. 1.1: Přehled pásem pro ZigBee.	13
Tab. 1.2: Typy používaných rámců v ZigBee.	14
Tab. 3.1: Obsah vývojového kitu.	27
Tab. 6.1: Změřené hodnoty signálu v závislosti na vzdálenosti uvnitř obytné místnosti.	49
Tab. 6.2: Změřené hodnoty signálu v závislosti na vzdálenosti uvnitř garáže.....	50
Tab. 6.3: Změřené hodnoty signálu v závislosti na natočení vysílače (u metod 1 a 2).....	52
Tab. 6.4: Změřené hodnoty signálu v závislosti na natočení vysílače (metoda 3).....	54
Tab. 6.5: Měření závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (1).	56
Tab. 6.6: Měření závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (2).	57
Tab. 6.7: Měření závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (3).	58

Úvod

Diplomová práce se zabývá možností měření vzdálenosti mezi bezdrátovými moduly založenými na technologii ZigBee. Jedná se o experiment, který má určit použitelnost odhadu vzdálenosti na základě úrovně změřeného signálu v praxi. Tento způsob zjišťování vzdálenosti není běžně používán, takže bude zajímavé zjistit, jestli je úroveň signálu použitelná alespoň pro hrubý odhad vzdálenosti. Není však zaručené, že metoda bude v praxi realizovatelná. Výsledný program bude odladěn na poskytnuté platformě vývojového kitu Freescale 1321XDSK-BDM/FSL. V teoretické části práce budou popsány základy technologie včetně zaměření na konkrétní vývojový kit založený na tomto standardu. Podrobněji bude vyšetřena možnost zjištění vzdálenosti ZigBee modulů na základě úrovně přijímaného signálu. Stěžejní část diplomové práce bude měření hodnot úrovně signálu v závislosti na vzdálenosti při různých podmínkách (uvnitř budov, otevřená prostranství) s vybranou a upravenou aplikací. Zkoumány budou také různé vlivy působící na konečný odhad vzdálenosti jako například vzájemné natočení modulů, přítomnost cizích předmětů v dosahu signálu atd. V závěru bude diskutována vhodnost použití experimentálního měření vzdálenosti na základě úrovně signálu. Výsledkem práce tedy bude v případě použitelnosti metody navržená aplikace, která převede změřenou úroveň signálu na vzdálenost.

ZigBee je velice perspektivní způsob wireless komunikace, která najde své uplatnění v mnoha, většinou průmyslových, odvětvích. V dnešní době existuje spousta celosvětových standardů v oblasti bezdrátové komunikace pod záštitou institutu IEEE. Jednotlivé techniky bezdrátového přenosu se vyskytují ve stále obsáhlejších oblastech. Bezdrátová komunikace má několik nesporných výhod jako například mobilita propojených zařízení nebo absence propojovacího materiálu. Vývojáři platforem pro bezdrátové aplikace se museli překlenout i přes mnohá negativa. Jde zejména o problematiku napájení bezdrátových modulů a v neposlední řadě také mnohonásobně vyšší možnost rušení komunikace. ZigBee je někdy uváděna jako přímý konkurent technologie Bluetooth, přesto se ale v základních aspektech od ní liší. ZigBee je primárně určena pro aplikace a účely průmyslové automatizace, které mají jistá specifika. Narozdíl od Bluetooth se nepočítá s přenosem velkého objemu dat. Zařízení mohou být používána v oblasti rušivých signálů a musí být konstruována s co nejmenším možným odběrem energie. Je možné tedy říci, že ačkoliv standard ZigBee je mnohdy považován za silného konkurenta Bluetooth, ve skutečnosti naleznou obě technologie zcela odlišného využití. Důkazem, že se jedná o silný počín v oblasti wireless komunikací, může být také založení tzv. ZigBee aliance za účelem dalšího vývoje. Členy aliance jsou světoznámé firmy působící v oblasti konstrukce zařízení pro průmyslovou automatizaci (více než 150 aktivních členů).

1 Technologie Zigbee

1.1 Charakteristika technologie

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jde o relativně nový standard pro bezdrátovou komunikaci založený na *IEEE 802.15.4* a platný od listopadu 2004. Je velice podobný konkurenčnímu **Bluetooth**. Sítě využívající ZigBee řadíme do skupiny bezdrátových sítí PAN a tyto umožňují komunikaci nízkovýkonových zařízení pomocí rádiového signálu až do vzdálenosti 75m. Hlavním impulzem pro vznik této technologie byl nedostatek vyhovujících řešení pro bezdrátové senzorové sítě. Zejména proto, že mají určitá specifika, kterým nevyhovoval žádný z existujících standardů :

- *přenos malého objemu dat*
- *vysoká pravděpodobnost rušení signálu*
- *důraz na co nejmenší možnou energetickou spotřebu částí*
- *napájení modulů z tužkových nebo knoflíkových baterií [1]*

Tak vznikla v roce 2002 **Zigbee alliance**, která začala pracovat na vývoji architektury pro levný obousměrný bezdrátový přenos s důrazem na minimální spotřebu elektrické energie. Jak uvádí samotná ZigBee aliance, nejde v tomto případě o protlačování konkrétní technologie nebo vznik konkurence produktu Bluetooth, ale spíše o poskytnutí doplňkového řešení pro senzorové a kontrolní systémy. [1]

Oblast použití ZigBee:

- automatizace budov, konkrétně zabezpečení, kontrola přístupu nebo například ovládání světel
- zdravotnictví
- průmyslová automatizace
- počítačové periferie a spotřební elektronika [1]

ZigBee definuje tři základní typy přenosu dat:

- periodicky se opakující (přenos dat z čidel)
 - nepravidelné přenosy (obsluhy externích událostí)
 - opakující se přenosy u nichž je požadavek na malé zpoždění (např. klávesnice, myš)
- [1]

Tab. 1.1: Přehled pásem pro ZigBee.

Použití	Pásmo	Poznámky
Globální použití	ISM 2,4 GHz	16 kanálů, přen. rychlost až 250 kbps
Amerika, Austrálie	915 MHz	10 kanálů, přen. rychlost až 40 kbps
Evropa	868 MHz	1 kanál, přen. rychlost až 20 kbps

Pro přenos bylo definováno několik rádiových pásem, aby bylo možné použití v různých zemích s jinými předpisy a kritérii. Hlavním problémem při definici rádiových pásem jsou především odlišnosti v organizaci rádiových pásem v Evropě a Americe. Z důvodu uplatnění standardu v obou zmiňovaných oblastech byla definována tři rádiová pásma. [4]

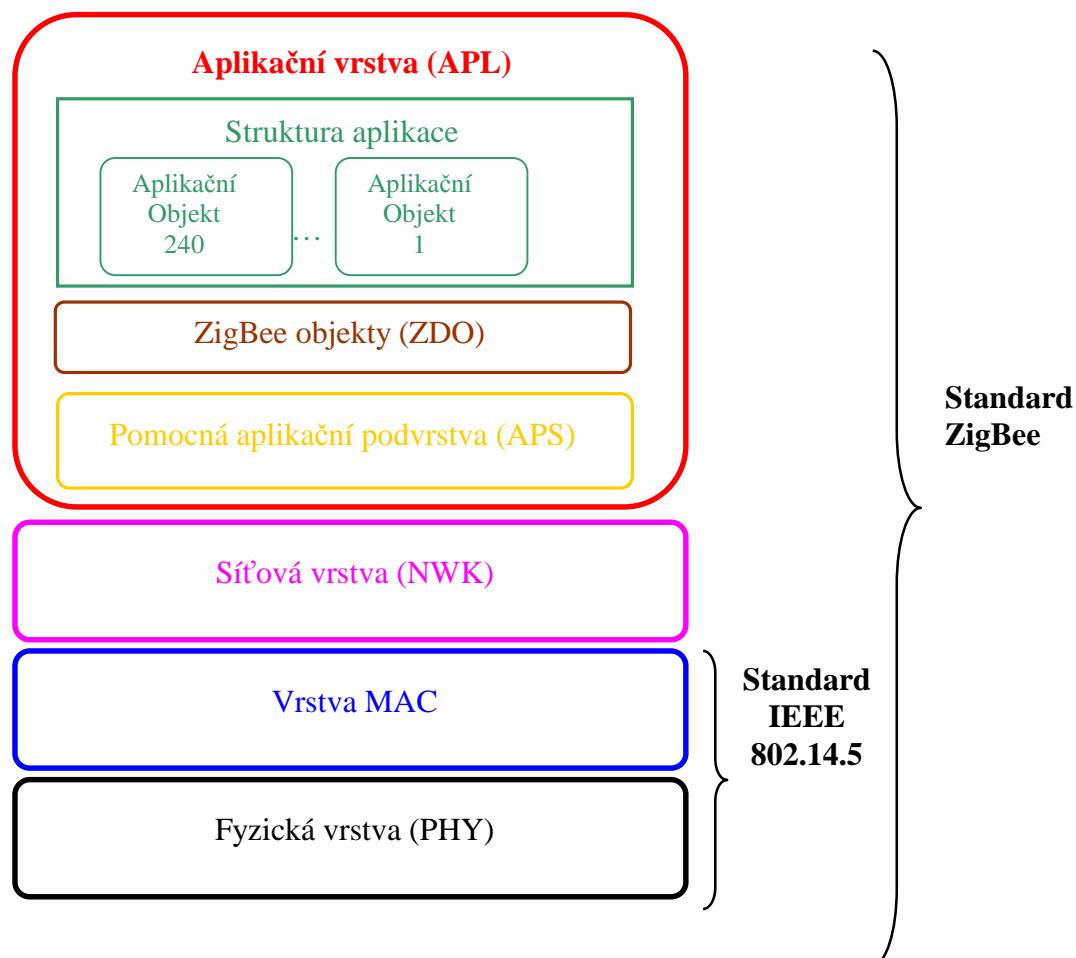
1.2 Struktura komunikačního standardu

Zejména kvůli implementaci do málo výkonných mikroprocesorů jako HCS08 nebo x51 je kladen důraz na maximální jednoduchost při vytváření protokolů. Bylo dosaženo struktury protokolů o velikosti zhruba 30 kB programové paměti (samozřejmě záleží na složitosti cílové aplikace). Referenční model standardu ZigBee vychází z referenčního modelu OSI a můžeme si jej prohlédnout na obrázku 1.1. Fyzická vrstva (PHY) vysílá a přijímá datové jednotky. Spojová vrstva je dělena na dvě podvrstvy – MAC a LLC. MAC slouží k řízení metody přístupu a odděluje fyzickou vrstvu od horní spojevé podvrstvy LLC a v neposlední řadě také definuje vlastní komunikační protokol, který je založen na přenosu datových rámců. Jednotlivé typy rámců se stručným popisem si můžeme prohlédnout v tabulce 1.2. LLC se stará o řízení logického okruhu a díky MAC je zcela nezávislá na použitém přenosovém prostředku. Využití přenosové cesty je závislé na konkrétní topologii sítě a také na metodě přístupu ke společnému médiumu. Další vrstvy jsou již definovány ZigBee aliancí. Úkolem síťové vrstvy (NWK) je především zabezpečení rámců a jejich směrování k cíli. Tato vrstva se však vyskytuje pouze u plně funkčních zařízení (viz kapitola 1.3). Další vrstva v pořadí je podvrstvou aplikační vrstvy (APL). Jedná se o pomocnou aplikační podvrstvu, která udržuje vazební tabulky a s jejich pomocí následně propojuje dvě zařízení na základě jejich služeb. Přeposílá také zprávy mezi vzájemně provázanými zařízeními. Objekt ZigBee (ZDO) slouží k definici role zařízení v dané síti, odpovídá na žádosti spojení, zřizuje zabezpečené spojení mezi zařízeními sítě a také zprostředkovává hledání zařízení v síti. [5]

Tab. 1.2: Typy používaných rámců v ZigBee.

Typ rámce	Popis jeho funkce
Data Frame	Rámec využívaný pro přenos užitečných dat, lze přenést až 104 bytů.
Beacon Frame	Zprávy používané k uvedení klientských zařízení do spánkového režimu
Acknowledgement Frame	Rámec obsahuje potvrzovací informace, využíván na úrovni MAC.
MAC Command Frame	Rámec k nastavení a řízení klientských zařízení v síti ZigBee.

ZigBee používá jednoduchou metodu, která minimalizuje vznik kolizních situací a interferencí. Umožňuje tedy znásobit počet zařízení, která spolu mohou komunikovat na jedné frekvenci. Použitý mechanismus přístupu ke sdílenému médiumu se nazývá CSMA/CA – značí přístup ke společnému médiumu s předcházením kolizí. Kdykoliv chce stanice vysílat, musí nejprve zjistit volnost kanálu (CCA), aby se ujistila, že kanál není používán žádným jiným zařízením k přenosu dat. Pokud je kanál volný, začne stanice vysílat data. Rozhodnutí, zda je kanál volný nebo ne, může být založeno na měření spektrální energie zamýšleného frekvenčního kanálu nebo na detekci typu přenášeného signálu. [5]



Obr. 1.1: Struktura referenčního modelu ZigBee 1.0.

Pokud zařízení hodlá vysílat data, musí se nejprve přepnout do přijímacího módu, aby mohlo vypátrat a určit sílu signálu v požadovaném kanále. Tento úkon je znám jako detekce energie (ED – z angličtiny „energy detection“). V módu ED se přijímač nesnaží o rozkódování signálu, pouze odhaduje velikost signálu. Když se v uvažovaném pásmu nachází nějaký signál, ED nerozhoduje ani o tom, jestli se jedná o signál standardu 802.15.4 či nikoliv. Další možnost určení obsazenosti kanálu je metoda CS („carrier sense“). Narozdíl od ED je u „carrier sense“ zjištěno, zda se jedná o signál standardu 802.15.4. Pokud ano, je na zařízení určit obsazenost kanálu, i když je úroveň signálu pod uživatelem definovanou

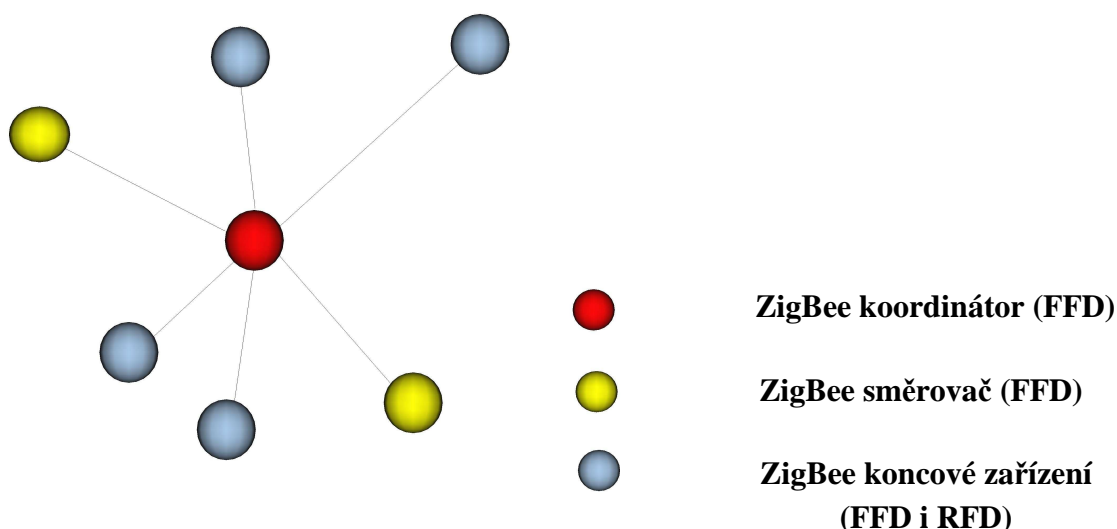
prahovou úrovní. V případě obsazení kanálu zařízení vyčká a po náhodné době se pokusí o vysílání znovu. Nahodilé stažení a opětovný pokus o vysílání je opakován do doby, než zařízení detekuje prázdný kanál anebo dosáhne uživatelem definovaný maximální počet opakování. [5]

1.3 Topologie ZigBee

Zigbee rozděluje zařízení v síti podle funkčnosti na:

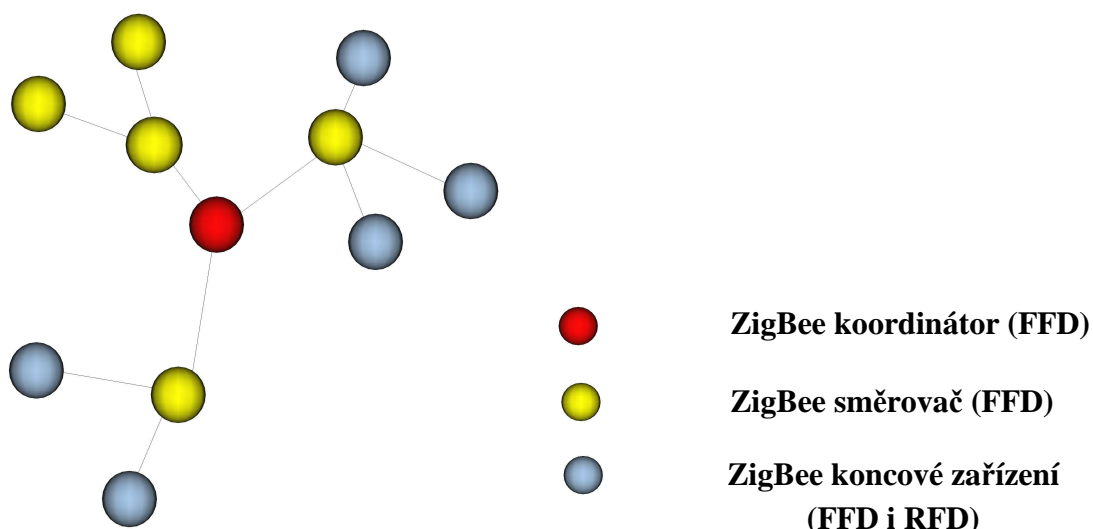
1. FFD (Full Functionality Device) – implementují kompletní protokolový rámec a jsou schopna zajistit všechny stanovené služby v rámci standardu.
 2. RFD (Reduced Functionality Device) – tato zařízení implementují pouze základní protokolové knihovny z důvodu maximálního omezení hardwarové náročnosti.
- [1]

Zigbee, vystavěná na fyzické a linkové vrstvě IEEE 802.15.4, udává tři různé síťové topologie. Základní je *hvězdicové uspořádání* sítě (anglicky „star“), které si můžeme prohlédnout na obrázku 1.2. Hlavním prvkem hvězdicové sítě je centrální prvek označovaný jako *koordinátor*. Koordinátor musí být FFD zařízení stejně tak jako další možný stavební kámen topologie – *Zigbee směrovač*. Posledním typem zařízení v síti může být *koncové zařízení*. U něj není striktně určeno, zda se musí jednat o FFD nebo RFD zařízení. Koncová zařízení komunikují přímo s koordinátorem sítě. [4, 5]

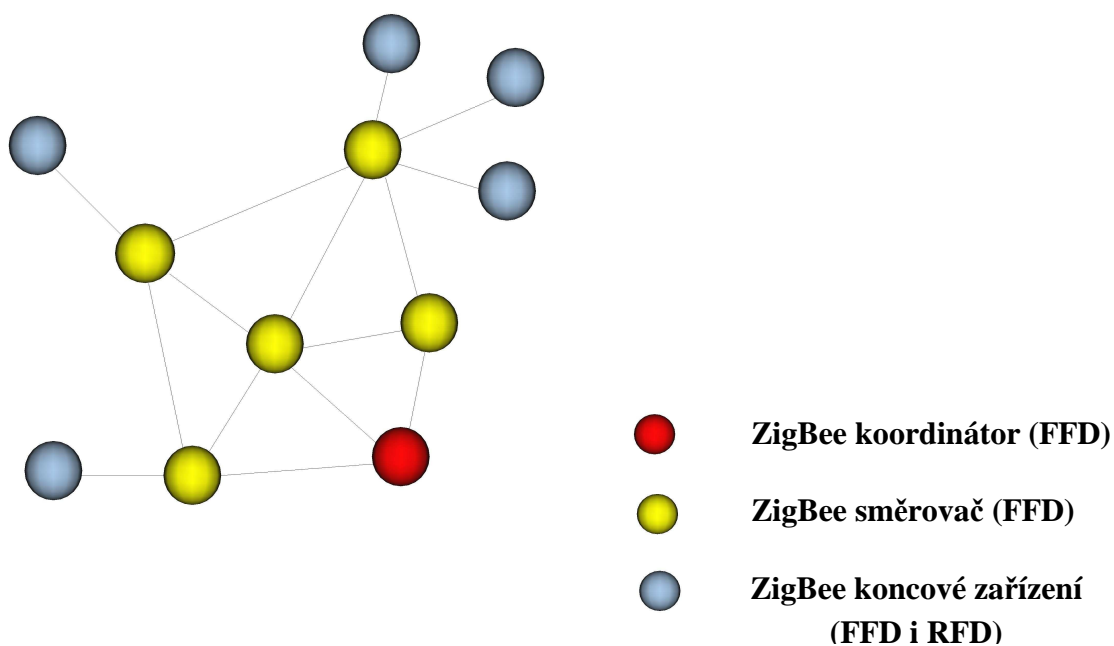


Obr. 1.2: Topologie sítě „hvězda“.

Dalším typem topologie je „*strom*“ (anglicky „tree“) na obrázku 1.3. Zde slouží také jedno zařízení jako *koordinátor* a ostatní se označují jako *koncová zařízení*. Hlavním rozdílem oproti předchozímu uspořádání je, že zde nemusí koncová zařízení komunikovat přímo s koordinátorem, nýbrž mohou využívat jiné FFD zařízení, které je v síti definované jako *směrovač* nebo *prostředník*. Hlavním důvodem použití tohoto druhu sítě je schopnost libovolně zvětšit vzdálenost mezi koordinátorem a koncovým zařízením. [4, 5]



Obr. 1.3: Topologie sítě „strom“.



Obr. 1.4: Topologie sítě „sít“ („mesh“).

Poslední možností uspořádání je síť (z anglického „mesh“). Topologie umožňuje, aby mezi sebou komunikovaly rovnocenné uzly (peer-to-peer komunikace). Stejně jako ve stromovém uspořádání, tak i zde spouští komunikaci a stanovuje parametry síť *koordinátor*. Nespornou výhodou je skutečnost, že s pomocí mesh sítě lze simulovat téměř libovolné uspořádání účastnických zařízení. [4, 5]

Zařízení vybrané jako PAN koordinátor má tři základní povinnosti:

- Přidělit jedinečnou adresu (16-ti nebo 64-bitovou) každému zařízení v rámci sítě.
- Vytvářet, přerušovat a směřovat zprávy celou sítí.
- Vybrat jedinečný PAN identifikátor pro síť. Identifikátor umožňuje zařízením, která nenáleží do žádné sítě, na základě krátké 16-bitové adresy komunikovat s libovolnými dalšími zařízeními. [1]

1.3.1 Beacon enabled a non-beacon síť

I když bylo výše popsáno, že ZigBee používá metodu CSMA/CA k přístupu ke společnému médiu, může dojít ke komunikaci v síti i bez této metody. To je umožněno na základě dvou možností přístupu k vysílacímu kanálu a to přístupu s konkurencí (CSMA) a bez konkurence zařízení. První případ již byl popsán a používá techniku CSMA/CA. Ve druhém případě přiřadí PAN koordinátor určitému zařízení jeho časový slot, který se nazývá GTS. Díky tomu může zařízení s GTS začít vysílat v době přidělené GTS bez použití metody CSMA/CA. [1, 4]

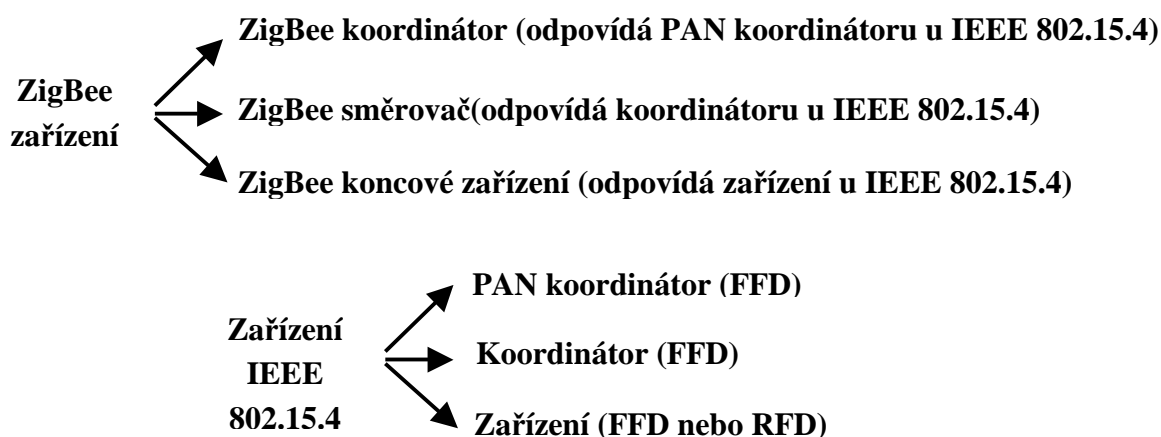
Pro poskytnutí GTS se musí PAN koordinátor ujistit, že všechna zařízení v síti jsou synchronizována. Beacon je zpráva speciálního formátu sloužící ke sjednocení časů jednotlivých uzlů v síti. Koordinátor má možnost vysílat beacon signály k synchronizaci zařízení, se kterými je ve spojení. Právě tomuto způsobu se říká „beacon enabled PAN“. Nevýhodou používání beacon rámců je skutečnost, že zařízení v síti se musí „probouzet“ v daných intervalech, naslouchat beacon signálu, synchronizovat svoje vnitřní hodiny a vrátit se do režimu spánku. To znamená, že mnohá zařízení se dostávají z režimu spánku jen kvůli synchronizaci vnitřních hodin a ne kvůli vykonání určitého úkolu. Z výše popsaného plyne, že výdrž bateriově napájeného zařízení bude logicky nižší. [1, 4]

Sítě, ve kterých se nepoužívají beacon rámce, jsou známy jako „non beaconing síť“. Neposkytují se zde GTS a tudíž zařízení nemohou být synchronizována s dalšími. Zařízení v non beaconing sítích jsou charakteristická delší výdrží baterií, protože nejsou tak často uváděna z režimu spánku do aktivního režimu. [1, 4]

1.4 Úkoly zařízení v síti

V sítích založených na standardu IEEE 802.15.4 mohou mít zařízení tři odlišné role: *koordinátor*, *PAN koordinátor* a *zařízení*. Koordinátor je FFD zařízení schopné posílat zprávy. Pokud je navíc koordinátor hlavním dozorcem nad sítí PAN, nazývá se *PAN koordinátor*. Pokud zařízení nevystupuje v roli koordinátora, říká se mu jednoduše *zařízení*. [1]

Naproti tomu ZigBee používá mírně odlišnou terminologii (viz obr. 1.5). *ZigBee koordinátor* odpovídá PAN koordinátoru v 802.15.4. *ZigBee směrovač* je zařízení, které v IEEE 802.15.4 odpovídá koordinátoru. A nakonec *koncové zařízení ZigBee* je takové, které není ani směrovačem ani koordinátorem. Zařízení ZigBee je charakteristické nejmenší pamětí a většinou bývá také nejlevnějším prvkem celé sítě. [1]



Obr. 1.5: Rozdíly mezi názvy ve standardu 802.15.4 a ZigBee.

V celé síti bývá vždy jen jeden PAN koordinátor a je to zařízení, které může pracovat v poměrně dlouhých periodách. To je také důvod, proč zařízení tohoto typu bývá připojeno na hlavní zdroj. Všechna ostatní zařízení bývají většinou bateriově napájena. Nejmenší možnou síť dostaneme zapojením PAN koordinátoru a zařízení. [1]

1.5 Adresování

Každé zařízení v síti je charakterizováno jedinečnou adresou. IEEE 802.15.4 používá dvě metody adresování :

1. 16-bitové krátké adresování.
2. 64-bitové rozšířené adresování.

Krátké adresování umožňuje komunikaci i bez jednoduché sítě. Použití kratšího způsobu adresování vede k redukci délky zprávy a šetří tak požadované paměťové místo určené pro ukládání adres. Kombinace jedinečného identifikátoru PAN a krátké adresy může být použito pro komunikaci mezi nezávislými sítěmi. [1]

Síťová vrstva ZigBee protokolu (NWK) přiřazuje 16-bitovou adresu navíc k IEEE adrese. K mapování každé 64-bitové adresy IEEE na jedinečnou NWK adresu je použita jednoduchá vyhledávací tabulka. Vrstva NWK vyžaduje používání NWK adres. [1]

2 Metoda CCA

Hlavní náplní práce je zjišťování vzdálenosti ZigBee modulů na základě analýzy intenzity přijímaného signálu. Jednou z hlavních součástí (CSMA/CA) jsou algoritmy CS a ED. [1]

U obou algoritmů je totiž stěžejní zjištění a vyhodnocení intenzity přijímaného signálu v zamýšleném kanále a na základě toho rozhodnutí, zda je kanál volný k vysílání nebo je naopak obsazen. Intenzita přenášeného signálu je ukládána do registrů mikrokontroléru, ze kterých ji lze libovolně číst a podle zjištěných hodnot například odhadnout zmiňovanou vzdálenost nebo pouze to, zda je objekt v pohybu či nikoliv.

V případě CSMA/CA přístupové metody ke sdílenému médiu (v našem případě jde o jednotlivé rádiové kanály na exaktně daných frekvencích) je nejprve ze strany MAC vrstvy vyslán požadavek fyzické vrstvě na provedení CCA, aby se zjistilo, zda není uvažovaný kanál obsazený vysíláním jiné stanice. Metoda CCA je tedy jednou ze součástí řídicích služeb fyzické vrstvy (PHY). Výsledky ED nebo CS algoritmu jsou následně použity k rozhodnutí, zda je uvažovaný kanál volný či nikoliv. Rozlišujeme tři módy CCA a zařízení s fyzickou vrstvou vyhovující standardu 802.15.4 musí být schopno pracovat nejméně v jednom z nich. [1]

Jde o následující módy:

1. **CCA mód 1** – v tomto případě je prováděna pouze detekce celkové energie v kanále (ED). Pokud je změřená energie vyšší, než je předem nastavená prahová úroveň, je vysílací kanál shledán jako obsazený a není možné vysílání dat. Prahová úroveň pro ED může být nastavena výrobcem, ale díky příslušným registrům, o kterých bude řeč později, a s pomocí vývojových kitů, ji lze stejně tak dobře nastavit pro konkrétní aplikace programátorem.
2. **CCA mód 2** – řídí se pouze výsledky CS a kanál je označen jako obsazený jen pokud je detekován signál vyhovující standardu 802.15.4
3. **CCA mód 3** – jedná se o kombinaci předchozích dvou módů. Fyzická vrstva může tedy použít následujících dvou prostředků pro detekci provozu v kanále:
 - zjištěná úroveň signálu je nad prahovou úrovní a zároveň je zjištěný signál označen jako 802.15.4 kompatibilní.
 - zjištěná úroveň signálu je nad prahovou úrovní nebo je zjištěný signál označen jako 802.15.4 kompatibilní.

Vždy, když entita MLME na úrovni MAC vrstvy žádá entitu PLME fyzické vrstvy o zjištění stavu sdíleného média, mohou být výsledky následující:

- vysílání i příjem je zakázán a tedy algoritmus CCA se vůbec nevykoná.
- kanál je nečinný a může být použit k přenosu.
- kanál nebo transceiver je zaneprázdněn z důvodu:
 - použití kanálu jiným zařízením v síti.
 - vysílání nebo příjmu dat (CCA opět neproběhne).

Pozn.: PLME nerozlišuje mezi zaneprázdněným transceiverem a obsazeným kanálem. V obou případech je MLME doručena jedna zpráva. [1]

2.1 Energy Detection

Před každým vysíláním stanice se musí provést algoritmus CCA k zjištění obsazenosti kanálu. Pokud se zařízení ujistí, že kanál není používán k vysílání žádnou jinou stanicí, začne vysílat svůj vlastní signál. Rozhodnutí, zda je kanál volný či nikoliv, je založeno na měření spektrální energie v zamýšleném frekvenčním kanále nebo zjištění druhu signálu. [1]

Prvně jmenovaný způsob můžeme popsat následujícími řádky. Zařízení se při potřebě vysílání přepíná do přijímacího módu, ve kterém změří úroveň signálu v požadovaném kanále. Tento úkon je znám jako „detekce energie“ (ED). Hlavním rozdílem oproti druhému způsobu zjištění obsazenosti kanálu je, že přijímač se nesnaží případný nalezený signál dekodovat. Touto metodou tedy nelze zjistit, zda se jedná o signál specifikace IEEE 802.15.4. [1]

2.2 Carrier Sense

Druhou možnou cestou, jak zjistit obsazenost sdíleného kanálu je „carrier sense“ (CS). Na rozdíl od ED se zde provádí zjištění typu signálu, který je přítomen ve frekvenčním kanále. Pokud zařízení detekuje signál, který splňuje parametry standardu IEEE 802.15.4, může označit uvažovaný kanál za obsazený, i když je jeho úroveň pod předem definovanou hladinou. V případě, že zařízení označí kanál jako obsazený, pokusí se znovu o vysílání v náhodně vygenerované periodě. Náhodný návrat k vysílání se provádí tak dlouho, dokud není médium volné nebo dokud počet opakování nepřekročí uživatelem definovanou hodnotu. [1]

2.3 Link Quality Indicator

Určuje kvalitu příjmu paketů na základě měření intenzity přijímaného signálu (RSS). Měří se celková intenzita přijímaného signálu. Další možností je zjišťování poměru intenzity signálu v požadovaném kanále s celkovou pásmovou energií šumu (tzv. „signal-to-noise-ratio“, SNR). Logicky vyšší hodnota SNR vyúsťuje ve větší šanci, že paket bude doručen bez chyby přenosu, protože odstup signál – šum je vyšší a je tak menší šance zarušení užitečné informace. Přestože je signál s větším poměrem SNR považován za kvalitnější, v některých případech se o celkové kvalitě směrovací cesty rozhoduje jak na základě SNR tak i s přihlédnutím k hodnotě naměřené intenzity signálu. [1]

Standardně se měření LQI provádí pro každý přijatý paket. LQI musí mít minimálně osm jedinečných rozhodovacích úrovní. LQI indikátor je hlášen vrstvě MAC a na základě požadavků může být dále předáván jak síťové vrstvě (NWK), tak vrstvě aplikační (APL). Síťová vrstva může na základě indikátoru například rozhodovat, kterou cestou bude lepší vysílat pakety, aby se minimalizovala možnost chybného přijetí koncovým zařízením. LQI je pouze jeden z několika rozhodujících faktorů při selekci směrovacích cest. Jako příklad můžeme uvést situaci, kdy je bateriově napájené zařízení ve výhodné pozici v síti z pohledu LQI indikace, ale neustálé přeposílání zpráv přes tento uzel má za následek vybití jeho baterie mnohem dříve než vybití baterií v ostatních zařízeních. [1]

2.4 CCA Módy zahrnující LQI

Speciální případy funkcí přijímače nazvané „Clear Channel Assessment modes“ jsou dostupné k měření přijímané energie vybraného kanálu. CCA se dělí na dva základní algoritmy:

1. **Clear channel assessment** – provede měření intenzity signálu v uvažovaném kanále a tuto porovná s předvolenou prahovou úrovní.
2. **Energy detection** – provede měření intenzity signálu v uvažovaném kanále a vrátí změněnou hodnotu v dBm.

Provádění CCA, ED a stanovení LQI jsou jedny z hlavních úkolů fyzické vrstvy. [12]

CCA módy jsou spojeny s následujícími registry:

1. Dvojice bitů nazvaná *cca_type[1:0]*, která se nachází v registru Control_A Register 06. Bity 5 a 4 rozhodují, který algoritmus bude použit. Hodnota „0x1“ značí použití funkce CCA a hodnota „0x2“ zapsaná do této dvojice bitů znamená použití ED.

2. Osm bitů *cca_vt[7:0]* nastavuje prahovou úroveň funkce CCA, jedná se o bity 15 – 8 v registru CCA_Thresh Register 04.
3. **Průměrná intenzita přijímaného signálu je uložena v poli *cca_final[7:0]*, které se nachází v registru RX_Pkt_Latch Register 2D a jeho bitech 15 – 8. Toto pole je použito pro CCA, ED a LQI během příjmu.**
4. Další bity nazvané *power_comp[7:0]* poskytují hodnotu offsetu, který se přidává ke změřené hodnotě průměrné energie z funkce CCA/ED nebo LQI hodnotě z funkce RX. Bity se nachází v registru s označením CCA Thresh registr 04 (bity 7 – 0).
5. Stavový bit *cca* (1. bit) v registru IRQ_Status Register 24 je použit pouze pro algoritmus CCA a jeho hodnota nastavená na „1“ znamená obsazený kanál.
6. Stavový bit *cca_irq_status* (bit 5) v registru IRQ_Status Register 24 je nastaven na hodnotu „1“, pokud je ukončeno měření pro algoritmus CCA nebo ED. Pokud je navíc nastaven bit 10 (*cca_mask*) v Control_A Register 6, bude vygenerováno přerušení.
7. Pro CCA mód je doporučeno, aby byly řídicí bity *tx_strm*, *rx_strm* a *use_strm_mode* vynulovány. [12]

2.4.1 Funkce Clear Channel Assessment

Měří se průměrná energie v kanále a porovnává se s přednastavenou hodnotou prahové úrovně podle standardu IEEE 802.15.4. Nejdříve se přijímač „probudí“ z nečinnosti za dobu 144μs. Dalších 128μs je prováděno měření, ze kterého je vypočítána průměrná hodnota intenzity signálu a následně uložena do bitů *cca_final[7:0]*. Poté se musí převést hexadecimální hodnota do desítkové soustavy, vydělit dvěma a změnit znaménko, abychom získali úroveň signálu v dBm. Vzorec je tedy následující:

$$\text{Intenzita signálu v dBm} = -(\text{dec}[\text{cca_final}[7:0] : 2]). \quad (2.1)$$

Hodnota uložená v *cca_final[7:0]* je také ovlivněna offsetem uloženým v *power_comp[7:0]*. Standardní hodnota této proměnné je „0x8D“ a přidává se k výsledné změřené hodnotě během CCA. Vyrovňovací číslo přidané k interní změřené hodnotě je *power_comp[7:0] : 2*. Výsledný vzorec s jednotkou dBm znamená, že hodnota *power_comp[7:0]* musí být zvětšena nebo zmenšena o hodnotu „4“, aby to způsobilo změnu v celkovém výsledku rovnou 1 dBm. To se tedy rovná rozlišení ¼ dBm při úpravě *power_comp[7:0]* o „1“. [12]

Hodnota v *power_comp[7:0]* musí být zvětšena, abychom dostali nižší hodnotu CCA. Pokud tedy *cca_final[7:0]* a z ní vypočtená hodnota značí úroveň signálu o 4 dB větší než je skutečná změřená hodnota na vstupu, pak musíme provést zvýšení nastavené hodnoty *power_comp[7:0]* o hodnotu rovnou čtyřnásobku rozdílu, tedy:

$$\text{Power_comp}[7:0] = \text{dec}(0x8D) + 4 * 4 = 0x9D. \quad (2.2)$$

U mikrokontroléru MC13213 je potřebný offset 3,5 dBm kvůli teplotní kompenzaci. V *power_comp[7:0]* je tedy doporučeno uložit hodnotu „0x9B“ pro získání větší přesnosti výsledných hodnot intenzity signálu. [12]

Hodnota obsažená v *cca_final[7:0]* je porovnávána s přednastavenou prahovou úrovní uloženou v *cca_vt[7:0]*. Pokud je výsledná hodnota měření stejná nebo nižší než prahová úroveň, provede se nastavení *cca* na „1“, což značí obsazený kanál.

Hodnota z *cca_vt[7:0]* se vypočítává podle vzorce:

$$\text{Prahová hodnota} = \text{hex} ([\text{Prahová úroveň v dBm}] * 2). \quad (2.3)$$

Doporučená hodnota je – 82 dBm, což odpovídá „0xA4“ v hexadecimální soustavě. [12]

Následuje výpis typické posloupnosti při provádění CCA. Kontrolní bit *use_strm_mode* by měl být nastaven na „0“.

- Nastaví se frekvence, na které bude operovat přijímač (RX frekvence).
- MCU nastaví bit *RXTXEN* na „0“.
- Naprogramuje se prahová úroveň CCA (*cca_vt[7:0]*).
- Bit *cca_mask* je naprogramován na „1“, což povolí přerušení po skončení CCA.
- *Cca_type[1:0]* se nastaví na „01“ (značí použití CCA algoritmu).
- Do *xcvr_seq[1:0]* se naprogramuje hodnota „0x1“ pro použití CCA módu.
- Bit *TXRXEN* se nastaví na „1“.
- Po skončení měření můžeme vyčíst následující parametry:
 - *cca_final[7:0]* uchovává hodnotu průměrné úrovně síly signálu.
 - *cca* je nastaven na hodnotu „1“, pokud je detekován obsazený kanál.
 - *cca_irq* se nastaví na hodnotu „1“, což vyjadřuje ukončení algoritmu, v závislosti na platném nastavení může být vygenerováno přerušení.
- V odezvě na přerušení od MC13213 provede mikrokontrolér následující:
 - rozhodne o obsazení kanálu přečtením a kontrolou *cca_irq* a *cca*.
 - může zjistit úroveň signálu přečtením *cca_final[7:0]*.
- Posledním krokem je nastavení bitu *RXTXEN* na „0“. [12]

2.4.2 Funkce Energy Detect

Algoritmus detekce energie je podobný předchozímu algoritmu. Liší se pouze absencí porovnávání prahové úrovně signálu. Přijímač se také připravuje 144μs a poté je prováděno po dobu 128μs měření intenzity přijímaného signálu. Průměrná hodnota je následně uložena do pole *cca_final[7:0]*. I v tomto případě je k výsledku měření započítán offset 3.5 dBm. Stavový bit *cca* není detekcí energie ovlivněn.

Následuje výpis typické posloupnosti při provádění ED. Kontrolní bit *use_strm_mode* by měl být nastaven na „0“.

- Nastaví se frekvence, na které bude operovat přijímač (RX frekvence).
- MCU nastaví bit *RXTXEN* na „0“.
- Bit *cca_mask* je naprogramován na „1“, což povolí přerušení po skončení CCA.
- *Cca_type[1:0]* se nastaví na „10“ (značí použití ED algoritmu).
- Do *xcvr_seq[1:0]* se naprogramuje hodnota „0x1“ pro použití CCA módu.
- Bit *RXTXEN* se nastaví na „1“.
- Po skončení měření můžeme vyčíst následující parametry:
 - *cca_final[7:0]* uchovává hodnotu průměrné úrovně síly signálu.
 - *cca_irq* se nastaví na hodnotu „1“, což vyjadřuje ukončení algoritmu, v závislosti na platném nastavení může být vygenerováno přerušení.
- V odezvě na přerušení může mikrokontrolér zjistit intenzitu signálu přečtením hodnoty v *cca_final[7:0]*.
- Posledním krokem je nastavení bitu *RXTXEN* na „0“.[12]

3 Vývojový kit Freescale 1321XDSK – BDM

3.1 Vývojový kit

Kompletní vývojový kit sestává z potřebného hardware a software. Co přesně je součástí balení je popsáno v následující kapitole. BeeKit Wireless Connectivity Toolkit od Freescale je obsáhlá vývojová platforma obsahující knihovny pro bezdrátové sítě, šablony aplikací a příklady hotových aplikací. Grafické uživatelské rozhraní (GUI) programu dodávaného s kitem umožňuje každému uživateli vytvářet, upravovat a provádět nastavy různých bezdrátových síťových aplikací.

Tab. 3.1: Obsah vývojového kitu.

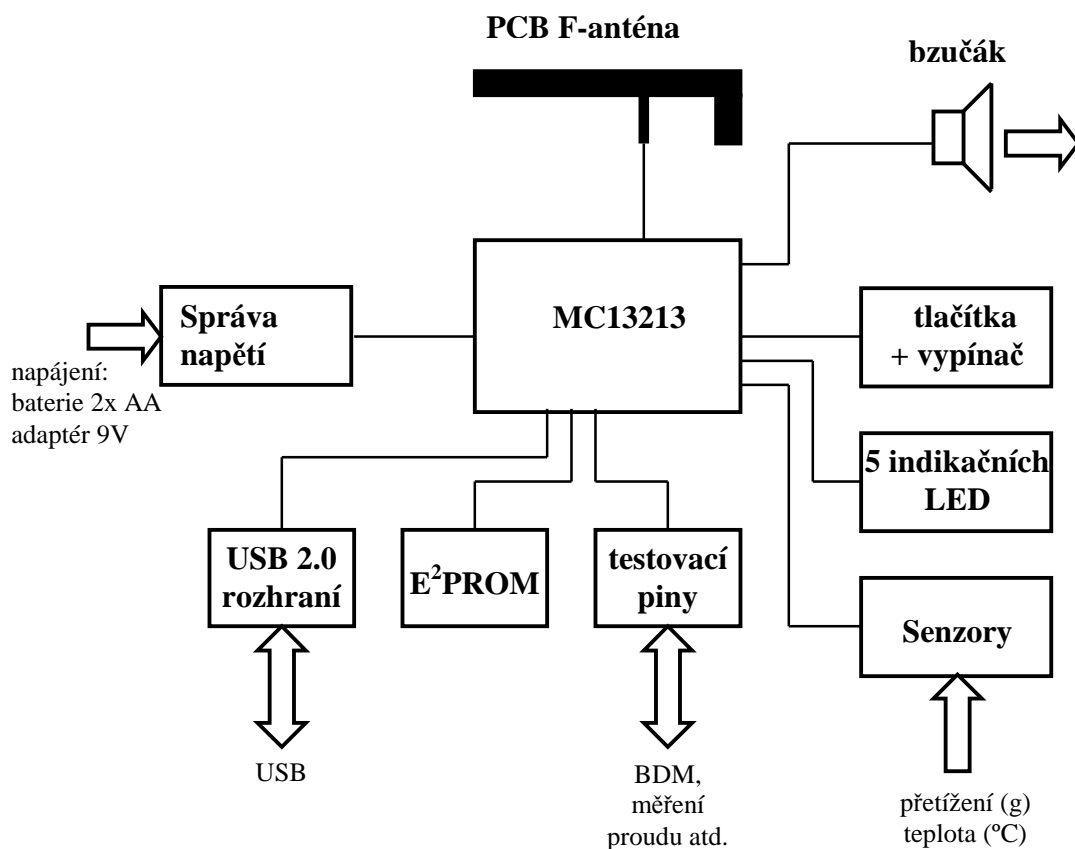
Označení	Funkce	Počet
Programovatelná deska 13213-SRB	Deska obsahující mikrokontroléry, transceiver a obslužné obvody pro vzájemnou komunikaci podle standardů 802.15.4.	2 ks
AC/DC adaptér, 9VDC W/4 ADPT	Adaptér pro napájení programovatelných desek.	2 ks
Kabel, 6ft, USB2.0 A – M, B – M černý	Kabely na propojení desek s PC.	3 ks
Kabel, rozhraní BDM (USB) – 68HC(S)12/68HCS08	Kabel k programátoru.	1 ks
Baterie alkalické AA	Baterie pro napájení desek.	4 ks (2 kusy / 1 deska)
CodeWarrior Development Studio for HC(S)08 and HC(S)12, special edition, W/Service pack CD	CD s programovacím softwarem.	1 ks
BeeKit CD	CD s programy Freescale BeeKit a ZeD.	1 ks
1321XDSK, MC1321X Development kit	Příručka ke zprovoznění kitu se základním programem.	1 ks
Technical information center Freescale semiconductor, Inc.	Příručka s kontakty a s informacemi o společnosti Freescale.	1 ks
USB HCS08/HCS12 Multilink technical summary	Příručka k programátoru.	1 ks
Warranty card, Freescale	Záruční list.	1 ks

3.2 Deska 13213 – SRB

Hlavní součástí desky je transceiver MC13213 pracující v rezervovaném pásmu ISM a to na frekvenci 2,4 GHz. Transceiver obsahuje nízkošumový zesilovač se jmenovitým výstupním výkonem 1 mW, PA s vnitřním oscilátorem řízeným napětím (VCO) a integrovaný přepínač vysílání a příjmu.

SRB deska je primárně napájena napětím o jmenovité hodnotě +3,3 V, které je vytvářeno LDO generátory. Uživatel může vybrat jednu ze tří možností napájení:

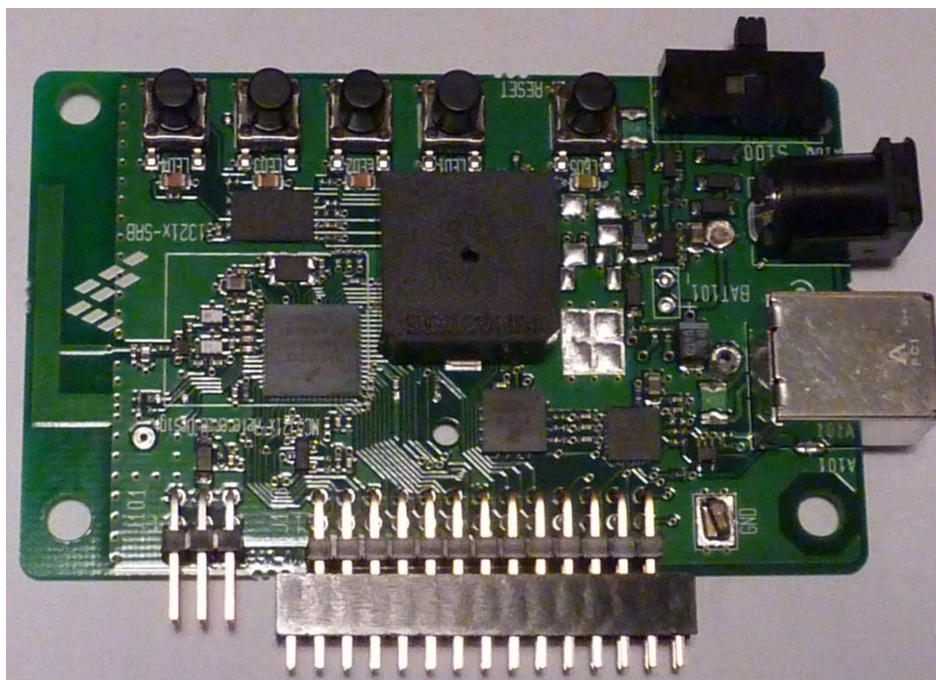
- z počítače přes rozhraní USB
- připojením 9V DC adaptéru
- dvěma bateriemi velikosti AA [10]



Obr. 3.1: Blokový diagram desky 13213 – SRB.

Deska může využít také tří typů instalovaných senzorů. Nejdůležitějším senzorem je akcelerometr označovaný jako XYZ senzor. Jedná se o nízkonákladový, kapacitní a miniaturní integrovaný obvod, který poskytuje následující funkce:

- úprava signálu
- A1-pólový filtr typu dolní propust
- kompenzace teploty
- „g-Select“ – umožňuje výběr ze čtyř citlivostí
- „Zero-g“ offset přes celý rozsah stupnice (nastaveno z výroby, bez potřeby externích zařízení)
- filtr mezních frekvencí (též nastaven z výroby) [10]



Obr. 3.2: Fotografie desky 13213 – SRB.

SRB deska obsahuje také teplotní čidlo s označením součástky LM61B. Jde o přesný integrovaný obvod umožňující měření teploty v rozsahu $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Napětí na výstupu obvodu je přímo úměrné stupnici teploty ve stupních Celsia. Citlivost detekce je udávána $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ a k hodnotě je přidáván stejnosměrný offset 600 mV . Jmenovité napětí na výstupu se tedy pohybuje od $+300\text{ mV}$ až po hodnotu $+1600\text{ mV}$ pro daný teplotní rozsah. Obvod LM61B je nastaven, aby poskytoval přesnost při pokojových teplotách přibližně $\pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při měření teplot v celém rozsahu můžeme očekávat přesnost s odchylkami $\pm 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čidlo může být volitelně připojeno a napájeno z portu MCU, aby se snížila jeho spotřeba. [10]

Pro zvukovou indikaci je na desce instalován bzučák. Zvukové zařízení je řízeno softwarově a připojeno přímo k obvodu MC13213. [10]

3.3 Transceiver MC13213

Jedná se o 71-pinové LGA pouzdro obsahující dva základní bloky:

1. Nízkovýkonový transceiver/modem (RF modem) pracující na rádiové frekvenci 2,4 GHz v pásmu ISM.
2. 8-bitový mikrokontrolér z rodiny HCS08 (MCU).

Mezi základní vlastnosti pouzdra patří:

- Modem kompatibilní se standardem 802.15.4 (operační frekvence 2,4 GHz, možnost výběru komunikace na jednom ze 16-ti kanálů, programovatelný výstupní výkon).
- Různé režimy činnosti šetřící spotřebu zařízení.
- Pracovní napětí od 2 V do 3,4 V s instalovanými napěťovými regulátory pro modem.
- Pracovní rozsah teplot od -40°C po $+80^{\circ}\text{C}$.
- Podpora jednoduché synchronizace z 16MHz krystalu nebo dvojice krystalů.
- Podpora SMAC, 802.15.4 a ZigBee programů.
- 71-pinové pouzdro LGA o rozměrech 9 x 9 x 1 mm. [10]

3.3.1 RF modem

Modem může pracovat na jednom ze 16-ti kanálů. Každý kanál podporuje O-QPSK modulaci s datovou přenosovou rychlostí až 250 kbps. Šířka jednoho přenosového kanálu je 5 MHz. Jmenovitý výstupní výkon modemu je standardně od -1 do 0 dBm s možností programování výkonu od -27 dBm do $+3$ dBm. Přijímací citlivost lepší než -92 dBm při jednoprocenní paketové chybovosti (velikost paketů 20 B). Uvnitř modemu se nachází přepínač vysílání a příjmu, který je řízen softwarově. Důležité je také integrování tří režimů činnosti za účelem zvýšení životnosti baterií. Programovatelná je i frekvence výstupního hodinového signálu používaného MCU. Modem obsahuje sedm vstupně/výstupních pinů jako doplněk ke GPIO pinům MCU. [10]

Modem obsahuje dva režimy přenosu dat:

1. **Paketový režim** – data jsou nejdříve nahrávána do paměti RAM a poté zpracována jako celé pakety, jednotka MCU je informována o přijetí celého paketu generováním přerušení.

2. *Režim streaming* – data jsou zpracovávána ihned po příchodu.

Programy Freescale 802.15.4 MAC podporují pouze streaming režim přenosu dat. [10]

3.3.2 MCU jednotka

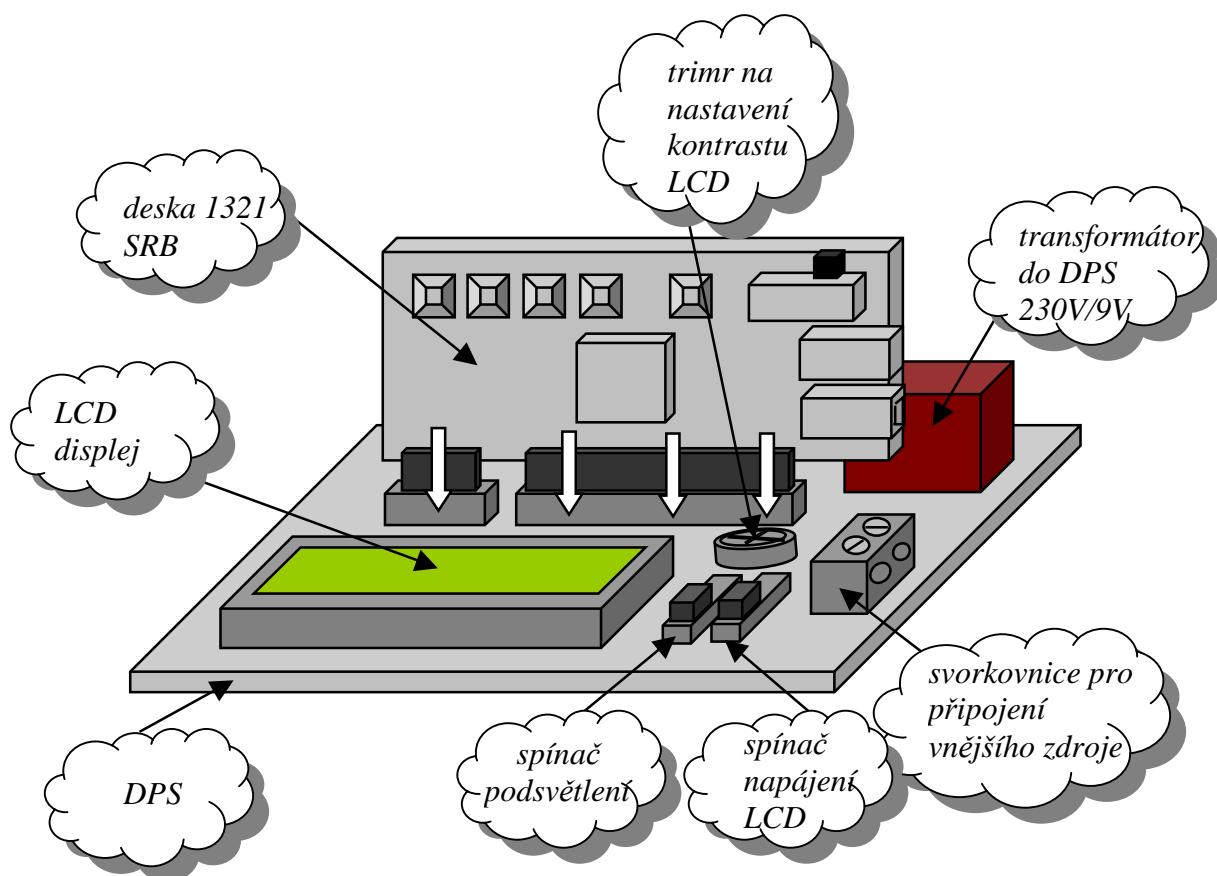
Jedná se o nízkonapěťový mikrokontrolér se 40MHz CPU jádrem obsahující 60 kB paměti flash a další 4 kB RAM. MCU má několik dalších důležitých vlastností:

- Obsahuje čtyři režimy činnosti minimalizující spotřebu energie.
- Rozhraní SPI vnitřně připojené k RF modemu.
- Jeden čtyřkanálový a jeden jednobitový 16-bitový časovač/pulsně šířkový modulátor.
- 8-bitový port ovládání klávesnice (KBI).
- 8-kanálový převodník ADC (8 – 10bitový).
- Dvě nezávislá sériová komunikační rozhraní (SCI).
- Možnost volby zdroje hodinových impulzů.
- Rozhraní IIC pracující s rychlostí 100 kbps.
- Možnost ladění programu a samotného programování desky přes zařízení BDM.
- Až 32 vstupně/výstupních pinů s programovatelnými pullup rezistory. [10]

4 Zobrazovací modul

4.1 Podoba zařízení

Pro měření vzdálenosti dvou modulů ZigBee je potřeba přídavné zařízení, na kterém je možno zobrazit získaná data. Freescale nabízí vývojový kit, který obsahuje desku s firemním označením 13213 – NCB. Na desce se nachází dvouřádkový LCD displej, na kterém je možno data zobrazovat. Jelikož jsem měl však k dispozici vývojový kit, který obsahoval pouze dvě desky 13213 – SRB, na kterých se LCD displej nenachází, musel jsem se pustit do návrhu vlastního zobrazovacího modulu. Tato činnost se nakonec stala jednou ze stěžejních náplní první poloviny diplomové práce. Základní myšlenkou bylo celé zařízení vystavět na principu použití desky SRB jako karty, která se zasune konektory do zobrazovacího modulu. Vytvoří se tak kompaktní celek, kdy bude mít uživatel snadný přístup ke všem ovládacím prvkům, které se na desce nacházejí. SRB deska by také měla být snadno programovatelná i v případě zasunutí do navrženého zařízení a je nutné vyřešit také otázku napájení. Bylo by nepraktické napájet zvlášť desku SRB a k tomu ještě zobrazovací modul.



Obr. 4.1: Zjednodušený náčrt zařízení.

Výhodné bude vytvořit vlastní zdroj a napájet jím celé zařízení. Měření bude tedy probíhat tak, že se jedna z desek SRB zasune do patič instalovaných v zobrazovacím zařízení. Druhá deska se stane mobilním uzlem, který bude periodicky odesílat zprávy statické desce SRB a ta bude na základě LQI indikátoru a algoritmu, který navrhnu, zobrazovat odhad vzdálenosti mezi oběma ZigBee zařízeními. Mobilní desku SRB nebude nutno nijak hardwarově upravovat a bude možné ji ponechat v plastové krabičce od výrobce. Druhou desku bude však nutné z krabičky vyjmout a instalovat ji do zobrazovacího modulu.

4.2 Volba ovládacích pinů

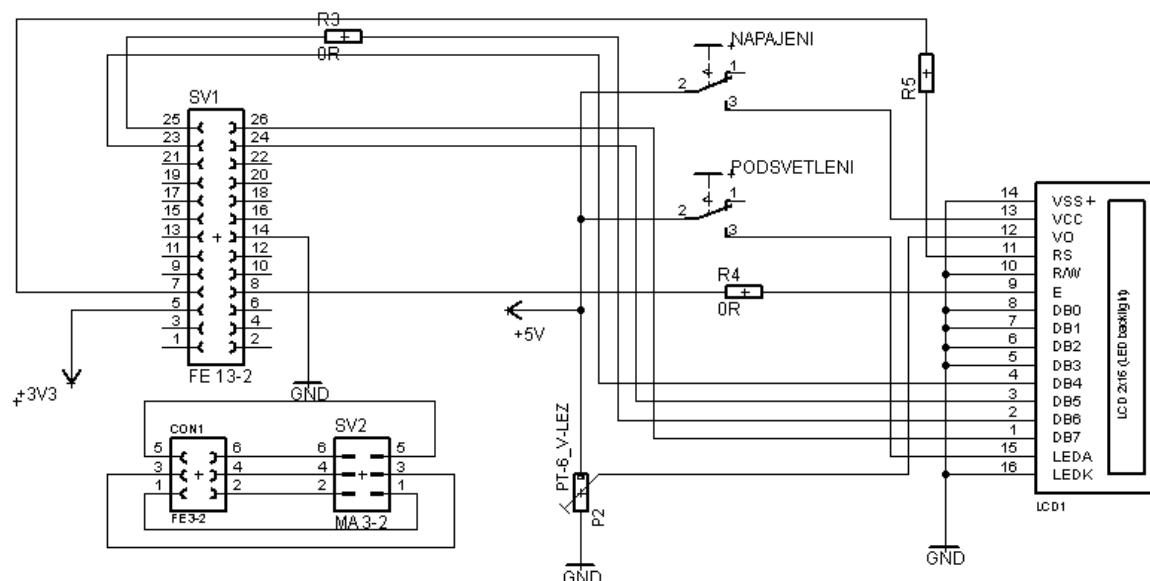
Deska SRB obsahuje 26-pinový konektor s vyvedením některých vstupně/výstupních pinů mikrokontroléru. Jediné volné piny, na které přicházelo v úvahu připojení LCD modulu, byly však pouze dva – pin s označením *PTA0/KBD0* (pin č. 7) a pin *PTA1/KBD1* (pin č. 8). Ostatní mají již přednastavené použití – jedná se například o vývody z akcelerometru (*Port B*) nebo vývody k ovládání diod a obsluhy tlačítek (většinová část *portů A a D*). Možným řešením by tedy byl destruktivní zásah přímo do desky a s tím spojená ztráta některého z užitečných prvků, které se na ni nacházejí. Tuto variantu jsem však po předchozí konzultaci s vedoucím práce zamítl. Musel jsem tedy přijít na jiný způsob, jak pomocí SRB desky ovládat zobrazovač.

Pro potřebu řízení klasických zobrazovacích displejů je nutné použití minimálně 6 bitů – tzn. šest volných vývodů mikrokontroléru (bit pro nastavení zápisu nebo čtení dat *RW* není třeba využívat, do displeje se bude pouze zapisovat a napájení displeje se může také připojit přímo, navíc jsem zvolil čtyřbitovou komunikaci). Dva zcela volné piny na desce, které jsou navíc vyvedeny i do výstupního konektoru, jsem popsal výše. Pin č.7 na *portu A* jsem se tedy rozhodl použít jako *LCD_RS* bit pro rozlišení charakteru dat přicházejících do LCD (data/příkaz). Pin č.8 na stejném portu bude pak sloužit jako *LCD_EN* bit (povolovací vstup).

V aplikaci nebude třeba použít instalovaný akcelerometr, takže pro zbývající potřebné bity (datové) se nabízí možnost využití právě těchto pinů z pouzdra MC13213. Ze schematu je však patrné, že na výstupu jsou zapojeny kondenzátory, které by mohly mít na řízení displeje negativní účinky. Po jednoduchém testu jsem však dospěl k závěru, že tyto piny bude možné užít jen s jednou malou úpravou – pro správnou funkci displeje bude stačit zvětšit RC časovou konstantu – jednoduše řečeno: každá požadovaná hodnota zpoždění ať už pro zápis dat nebo inicializaci displeje bude muset být zvětšena. Tak jsem se vyhnul počátečním problémům při inicializaci LCD displeje a jeho následném používání.

4.3 Návrh

K návrhu zobrazovacího zařízení jsem použil program Eagle Layout Editor ve verzi 5.6.0. Schéma zobrazovací části s LCD displejem a konektorové části si můžeme prohlédnout na obrázku 4.2. Část obsahující zdroj napětí se pak nachází na obrázku 4.3. Detailnějším popisu jednotlivých bloků se věnují následující kapitoly.



Obr. 4.2: Schéma zobrazovací části a konektorů.

4.4 Popis a funkce jednotlivých bloků

4.4.1 LCD displej

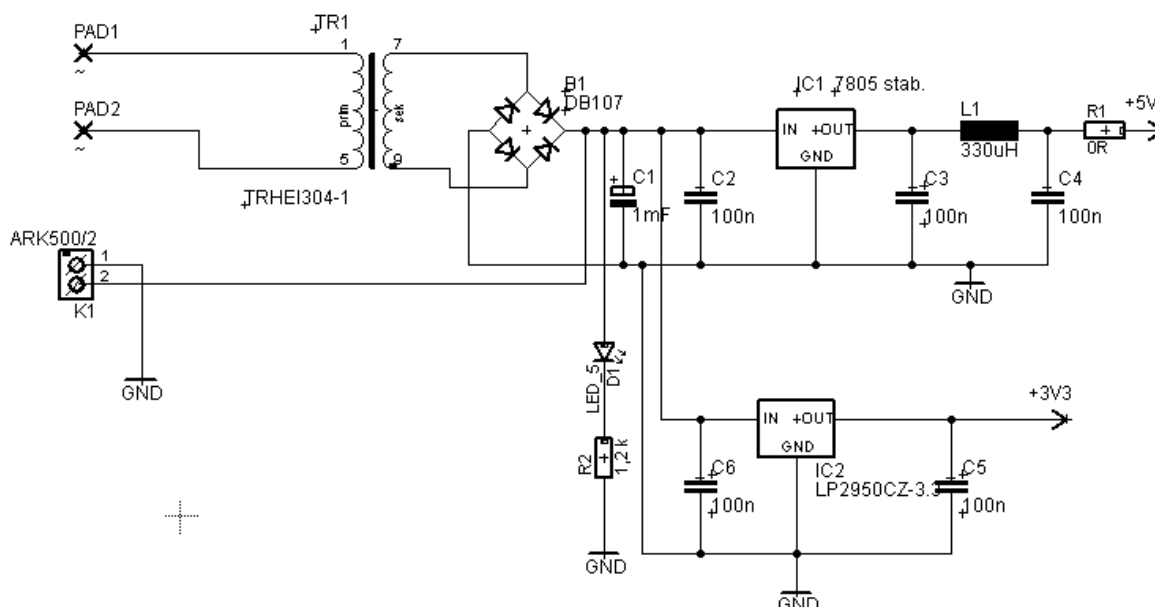
Na základě dřívějších praktických zkušeností jsem se rozhodl pro použití zobrazovacího displeje typu 2 x 16. Obsahuje i nejčastěji používaný řadič HD44780. Konkrétně padla volba na typ MC1602E – SYL/H s podsvícením displeje. Zvažoval jsem, zda podsvětlení použít, protože na celkové spotřebě desky se právě podsvícení podílí majoritní měrou. S podsvícením však bude zařízení vypadat efektněji a navíc bude možné využít alternativu bez podsvícení (například pro případ bateriového napájení).

Zvolený displej má celkem 16 pinů. Ze dvou módů komunikace (čtyřbitová nebo osmibitová) jsem vybral čtyřbitovou možnost, což byla víceméně nutnost z důvodů nedostatku volných pinů mikrokontroléru. Stručně bych nyní popsal úkoly jednotlivých

vstupů LED displeje a jejich úkol v mém zapojení. U výše jmenovaného displeje je číslování pinů poněkud nezvyklé. Zleva začíná vstup číslo 14 a dále se čísla snižují až do jedničky. Vstupy 15 a 16 sloužící k zapojení napájení podsvětlení, se již nacházejí na správném místě. Pro jednoduchost a ušetření dalšího ovládacího pinu jsem použil přímé napojení anody (pin 15) na kladné napětí 5 V za použití jednoduchého spínače. Samozřejmě by bylo možné připojit tranzistor a ovládat podsvětlení displeje přes mikrokontrolér. Katoda podsvícení je uzemněna (pin 16). Piny 1 – 4 jsou datové bity (*DB7 – DB4*), kterými je přenášena zobrazovaná informace. Piny 5 – 8 by byly použity jen v případě osmibitové komunikace s mikrokontrolérem, v mém případě jsou nevyužity a uzemněny. Pin 9 se nazývá *Enable* a slouží pro povolení zápisu dat na displej. Pin 10 určuje, zda se má ze zobrazovače číst nebo do něj zapisovat. Zde se bude k činnosti používat pouze zápis do zobrazovače, tudíž stačí pin uzemnit. Pin s číslem jedenáct signalizuje řadiči, zda mají data posílaná na displej charakter příkazu nebo dat. Bit s označením *VO* je zapojen na jezdec trimru, jehož přenastavením je možné docílit ideálního kontrastu displeje. Pro nastavení je postačující trimr o jmenovité hodnotě maximálního odporu 2,2 k Ω . Předposlední bit slouží k napájení zobrazovače a poslední bit (č.14) je uzemněn.

4.4.2 Napájecí blok

Součástí návrhu je i napájecí blok zobrazovacího modulu. Nejprve bylo nutné navrhnout část zdroje, která bude napájet samotný displej. Na začátek musím poznamenat, že uživatel bude mít možnost volby z několika napájecích alternativ. Přípravek bude možné napájet ze sítě nebo je připravena také klasická svorkovnice pro připojení stejnosměrného zdroje či alkalické baterie 9 V.



Obr. 4.3: Schéma zdroje.

Výstupní napětí potřebné k napájení obvodů zobrazovače je + 5 V. Nejprve bylo nutné vybrat transformátor síťového napětí na napětí, které je možné připojit na vstup stabilizátorů. Vybral jsem transformátor s výstupním napětím 9 V a maximálním proudem 166 mA, což by měly být dostatečně dimenzované hodnoty. V napájecím řetězci je použit klasický usměrňovací můstek a dále filtrační kondenzátor o hodnotě 1 mF. Stabilizátor 7805 je navíc doplněn trojicí kondenzátorů 100 nF a tlumivkou 330 μ H pro dosažení co nejstabilnějšího napájení.

Po zvážení jsem navíc doplnil i blok zdroje, který bude pomocí pinů 5 a 14 napájet desku SRB. Pro tu je potřebné napájecí napětí o hodnotě + 3,3 V. Do návrhu postačilo doplnit další stabilizátor LP2950CZ – 3,3 ošetřený opět dvojicí kondenzátorů 100 nF pro odstranění případných změn napětí na výstupu.

Pro indikaci přítomnosti napájecího napětí je zapojena do obvodu zelená LED dioda s ochranným odporem 1,2 k Ω .

4.4.3 Lišty a konektory

Dutinková lišta SV2, která je propojena s konektorem CON1, umožňuje programování desky SRB i v případě, že je tato zasunuta do zobrazovacího modulu. Další zásuvka má označení SV1 a je potřebná v kombinaci s CON1 k instalaci SRB modulu do modulu zobrazovače.

4.5 Konstrukce

Při konstrukci modulu zobrazovače jsem vycházel ze základních pravidel pro výrobu, osazení a oživení DPS. Nejprve bylo nutné nechat vyvolat samotný tištěný spoj podle předlohy z programu Eagle Layout Editor ve verzi 5.6.0. Využil jsem školní dílny, kde mi tištěný spoj na základě souboru „Board.brd“ vyrobili. Desku bylo ještě nutné ze strany spojů potřít roztokem kalafuny a nechat přibližně hodinu vyschnout při pokojové teplotě.

Následovalo odvrtání montážních děr pro osazení součástek DPS. Vrtáky byly použity o průměrech 0,6 – 1 mm (v závislosti na tloušťkách vývodů jednotlivých součástek). Otvory pro přišroubování distančních podložek byly vyvrtány vrtákem o průměru 3 mm a též pro vyvrtání otvorů pro připájení přívodu napájecí vidlice do sítě 220 V musel být použit vrták většího průměru. Tímto byla deska připravena k osazení součástek.

Při osazení a pájení součástek byla použita klasická mikropájecí stanice s regulací teploty hrotu. Nejprve jsem osadil a připájel nízké pasivní součástky – tedy odpory a

keramické kondenzátory. Následovalo pájení konektorů, patič a spínačů. Dále byly osazeny vyšší pasivní součástky (LED dioda, elektrolytický kondenzátor a tlumivka). Dalším krokem bylo osazení obou stabilizátorů napětí a diodového můstku. Zapájení síťového transformátoru a připájení vidlicového přívodu bylo předposledním úkonem osazování. Po kompletním osazení obou zdrojů jsem proměřil pro každý z nich výstupní napětí, které muselo odpovídat předpokládaným hodnotám + 5 V a + 3,3 V. Zbývalo již jen zapájet dvouřádkový displej.

Ze spodní části DPS jsem štipacími kleštěmi odstranil přesahující vývody jednotlivých součástek a provedl jsem vizuální kontrolu kvality jednotlivých spojů, abych předešel problémům při následném oživení zapojení. V rozích DPS jsem přišrouboval distanční podložky, aby bylo možné zobrazovač jednoduše položit na rovnou plochu aniž by hrozilo zkratování některého ze spodních vývodů.

Nyní zbývalo vyzkoušet, že je zobrazovací modul funkční. Z důvodu možnosti napájení zařízení ze sítě 220 V by mělo poškození transformátoru v zapojení fatální důsledky na činnost zařízení. Proto jsem ještě před instalací síťového transformátoru do zapojení proměřil hodnotu napětí na jeho výstupu (sekundární vinutí) při zapojení primárního vinutí do sítě. Po připojení zobrazovacího modulu na napájecí napětí indikovala zelená LED dioda přítomnost napájecího napětí (vzhledem k proměřování výstupů napájecích bloků byla správná funkčnost ověřena už při osazování). U LCD displeje bylo však nutné nastavit jeho kontrast pomocí odporového trimru P2. Menším šroubovákem stačilo nastavit hodnotu odporu, kdy se na prvním řádku LCD displeje zobrazilo všech 16 vyplněných segmentů (právě to charakterizuje neinicializovaný zobrazovací displej). Zbývalo již pouze vyzkoušet funkčnost podsvětlení displeje pomocí spínače a zařízení bylo připraveno k používání spolu s jedním z bezdrátových modulů. Na obrázku 4.4 si můžeme prohlédnout výslednou podobu zobrazovače bez instalovaného bezdrátového modulu.



Obr. 4.4: Zobrazovací modul.

4.6 Pokyny k užívání

4.6.1 Napájení

Pro bezproblémovou činnost zobrazovacího modulu, prevenci poškození bezdrátového modulu a prevenci před úrazem elektrickým proudem je nutné dodržovat následující pokyny.

Předně je pro uživatele nutné se rozhodnout, jakým způsobem bude zobrazovač napájet. Zařízení nabízí celkem tři odzkoušené možnosti:

1. Napájení ze sítě 220 V pomocí instalované vidlice.
2. Napájení ze stejnosměrného zdroje s nastavitelnou proudovou ochranou.
3. Napájení alkalickou baterií 9 V.

Pro síťovou variantu napájení nesmí dojít ke zkratování primárního vinutí transformátoru a uživatel musí předcházet možnosti kontaktu se živými částmi transformátoru. Pokud je zařízení napájeno ze sítě, musí se nacházet na rovné a nevodivé podložce. ***V případě nedodržení pokynů může dojít k úrazu elektrickým proudem nebo nenávratnému poškození celého zapojení!***

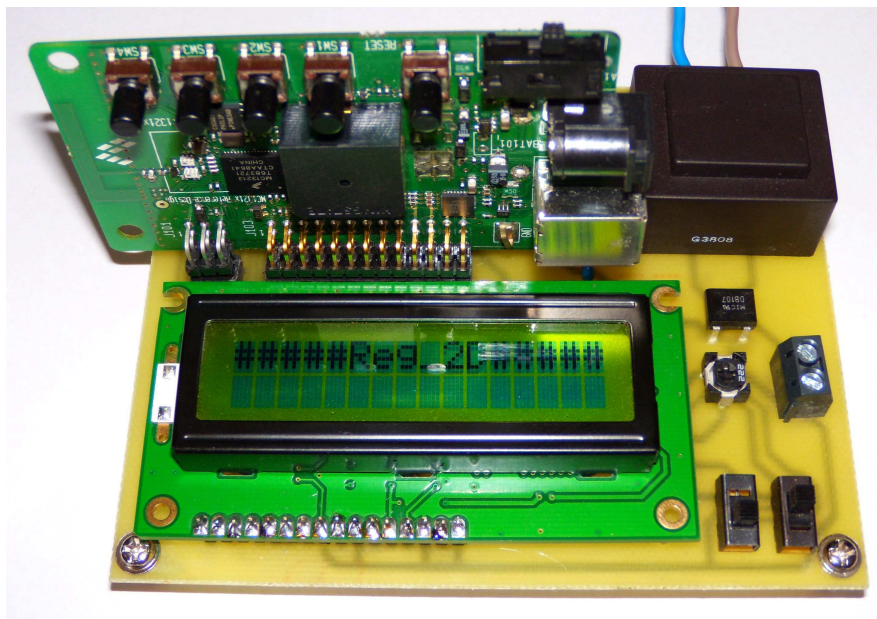
Pro napájení ze stejnosměrného zdroje se používá svorkovnice K1. Maximální hodnota stejnosměrného napětí ze zdroje nesmí překročit + 30 V a uživatel musí dbát na správnou polaritu napájecího napětí, která je vyznačena na spodní straně tištěného spoje. Po případném překročení maximální hodnoty přivedeného stejnosměrného napětí dochází k poškození instalovaných stabilizátorů, což může mít za následek poškození částí zobrazovače a především případného instalovaného bezdrátového modulu. Je doporučeno používat zdroj s indikací nebo ochranou před přetížením, které může vzniknout případným zkratováním některých vývodů při neopatrné manipulaci se zobrazovačem.

Zobrazovač jsem odzkoušel i s napájením z klasické alkalické baterie o nominální hodnotě napětí + 9 V. Zde však platí jedno omezení – podsvětlení zobrazovacího displeje musí být deaktivováno, protože způsobuje příliš velký odběr pro napájení z baterie. Odzkoušená životnost baterie při měřeních v terénu byla zhruba tři hodiny. Připojení baterie je realizováno opět na svorkovnici K1 a i zde je nutné dodržovat správnou polaritu napájení a předcházet případným zkratům v zapojení.

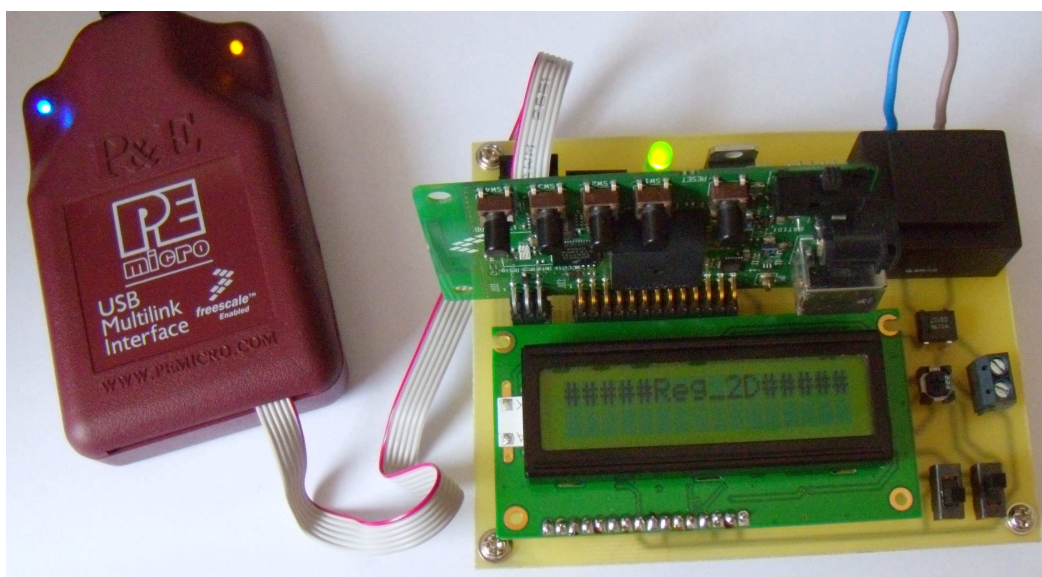
V žádném případě nesmí být zobrazovač napájen přes instalovaný bezdrátový modul. Tato možnost nebyla odzkoušena, protože ZigBee bezdrátové moduly k účelu napájení nejsou dostatečně dimenzovány a mohlo by dojít k nevratnému poškození vnitřních obvodů zapojení.

4.6.2 Instalace bezdrátového modulu

Pro zasunutí bezdrátového modulu ZigBee je nutné jej nejprve opatrně vyjmout z dodávané plastové krabičky. Pro instalaci do zobrazovače jsou určeny dutinkové lišty SV1 a SV2. Do těchto lišt se zasunou protikusy na straně bezdrátového modulu. **Instalace ZigBee modulu do zobrazovače se provádí zásadně při odpojeném napájecím napětí.** Až po správném usazení ZigBee modulu do zobrazovače může být napájení připojeno. Podobu zobrazovače s instalovaným ZigBee modulem obsahuje obrázek 4.5.



Obr. 4.5: Zobrazovací modul spolu se ZigBee modulem.



Obr. 4.6: Programování ZigBee modulu.

4.6.3 Programování

Abych předešel nutnosti neustálé instalace a vyjímání bezdrátového modulu při nutnosti programování, je možné ZigBee modul programovat přímo v zobrazovači. Nejprve je potřeba bezdrátový modul instalovat do zobrazovače podle kapitoly 4.6.2 a poté již stačí připojit programovací kabel na konektor CON1. Červený vodič musí být při zapojení blíže vnějšímu okraji desky. Při programování je nutné zobrazovač napájet použitím některého ze tří uvedených způsobů.

5 Aplikace

Kit 1321XDSK obsahuje přiložený software, který po nainstalování nabízí uživateli mnoho vzorových aplikací pro různé účely. Je velice výhodné z těchto aplikací vycházet a to zejména z časových důvodů. Pokud by nebyly k dispozici takto předpřipravené projekty, bylo by pro každého vývojáře nutné naprogramovat chování všech vrstev modelu aplikace (například fyzické a MAC vrstvy). Takovýto úkon by byl časově nesmírně náročný a navíc je programování jednotlivých vrstev mimo rozsah diplomové práce. Z množství vzorových aplikací jsem se tedy snažil vybrat tu, která by nejlépe vyhovovala použití pro měření vzdálenosti. Na základě výběru příslušné aplikace budou na této prováděny nezbytné úpravy pro zobrazení dat na LCD displej a na nejvyšší úrovni modelu bude sepsán kód, který zajistí uživateli možnost měření vzdálenosti mezi moduly.

Při výběru aplikace jsem byl limitován pouze její velikostí. Pro úspěšné nahrání do mikroprocesoru tak velikost nesměla překročit 60 kB kódu, právě to je totiž objem paměti MCU. Výsledná velikost byla však dále limitována použitou verzí IDE CodeWarrior, která po měsíčním používání v podobě plné verze přechází do trial verze, která nedovolí nahrání více jak 32 kB kódu. Z tohoto důvodu jsem nemohl použít vzorové ZigBee aplikace, ale musel jsem vybírat z codebase s označením SMAC. ZigBee programy měly téměř všechny velikost daleko překračující 32 kB. Velkým plusem SMAC aplikací byla však větší přehlednost zejména díky menšímu počtu zdrojových souborů.

5.1 Výběr programu

Po odzkoušení většiny z nabízených programů jsem se rozhodl použít aplikaci s původním názvem „Range demonstration plus“. Celé řešení sestává ze dvou samostatných projektů. Jeden s označením TX je určen k nahrání do ZigBee modulu, který bude vystupovat v roli vysílače. Druhý projekt s označením RX je přijímačem a právě v něm bude nutné implementovat kód, který umožní zobrazení dat na LCD displej a převede změřenou úroveň na odhad vzdálenosti. V části RX kódu bude začleněno i jednoduché menu pro ovládání a nastavení základních parametrů měření.

5.1.1 Chování původního programu

Všechny návody k jednotlivým programům jsou psány v angličtině, takže jsem se rozhodl alespoň nastínit funkci a zprovoznění původního kódu aplikace. Funkčnost programu po nahrání odpovídala přesně níže popsanému principu.

Ovládání programu:

1. Je nutné provést resetování obou bezdrátových modulů.
2. Po resetu se modul, do kterého je nahrána aplikace pro vysílač, identifikuje postupným probliknutím každé ze čtyř LED diod v pořadí od diody č.1 po diodu č.4. Druhý modul naprogramovaný jako přijímací poznáme tak, že po resetu se dvakrát na krátkou dobu rozsvítí a zhasnou všechny diody zároveň.
3. Pokud jsou moduly v rádiovém spojení, probíhá mezi nimi posílání paketů, což je signalizováno blikáním LED diody č.1. LED diody č.2 – č.4 indikují intenzitu přijímaného signálu.
4. Když zvětšujeme vzdálenost mezi oběma moduly, intenzita signálu slábne a na základě toho postupně zhasínají jednotlivé diody od č.4 po č.2. Rozsvícení všech diod tedy značí maximální intenzitu signálu a naopak svit pouze diody č.1 značí slabý signál.

5.2 Modifikace kódu

V některých zdrojových souborech aplikace bylo nutné provést drobné změny, aby bylo možné posílat ze ZigBee modulu data do sestrojeného zobrazovače. Znak „~“ zastupuje zbytek cesty, kde se nachází vytvořený projekt.

Název souboru: board_config.h
Umístění: ~\Range Demo Plus RX\Shared\drivers\
Funkce: Definuje typ desky, pro kterou je určena výsledná aplikace.
Změna kódu: V kódu bylo nutné povolit zobrazování na LCD. Klasický modul MC13213 – SRB totiž žádný LCD displej neobsahuje a tak je implicitní hodnota nastavena na „false“. Stačilo řádek s kódem „#define LCD_ENABLED FALSE“ nahradit:

```
#define LCD_ENABLED TRUE
```

Název souboru: LCD.c
Umístění: ~\Range Demo Plus RX\Shared\drivers\
Funkce: Obsahuje funkce spojené s provozem LCD displeje, jako inicializace, zápis dat, vyčištění displeje a také jsou zde definovány funkce pro časová zpoždění spojená s provozem displeje.
Změna kódu: V souboru jsem provedl smazání všech nastavení bitu *LCD_RW*, protože v mém zapojení se do displeje pouze zapisuje. Pro funkčnost zobrazení dat bylo dále nutné změnit délky jednotlivých zpoždění ve funkcích *LCDWaitShort()* a *LCDWaitLong()*.

Název souboru: MC1321XSRB.h

Umístění: ~\Range Demo Plus RX\Shared\drivers\

Funkce: Obsahuje přiřazení portů a pinů pro jednotlivé periferie v ZigBee modulu.

Změna kódu:

Zakázání akcelerometru:

```
#define ACCEL_ENABLED    FALSE
```

Nastavení jednotlivých pinů k ovládání displeje:

```
// nastavení pinů RS a EN
#define LCD_REG_SEL      PTAD_PTAD0
#define LCD_EN           PTAD_PTAD1

// nastavení pinů pro zasílání dat do LCD
#define LCD_DATA1        PTBD_PTBD4
#define LCD_DATA2        PTBD_PTBD5
#define LCD_DATA3        PTBD_PTBD6
#define LCD_DATA4        PTBD_PTBD7

// nastavuje první 2 bity na portu A jako výstupní +
// nastaví celý port B jako výstupní
#define LCD_INIT_MACRO   PTADD=0x03; PTBDD=0xFF;
```

Po provedení výše popsaných změn je již možné s pomocí odpovídajících funkcí zobrazovat na LCD displeji libovolná data.

Během zjišťování hodnot v terénu bylo postupně nutné aplikaci upravovat. V projektu TX jsem se rozhodl sepsat kód, který po počátečních inicializacích vyčká na zadání vysílače výkonu, se kterým bude modul dále fungovat. Po zapnutí nebo resetování modulu je tedy nutné tlačítkem SW1 postupným tisknutím nastavit výstupní hodnotu výkonu vysílače v rozmezí od „0“ do „15“. Potvrzení volby se provede stisknutím tlačítka SW2. Na diodách je poté zobrazena hodnota nastaveného výkonu v kódu BCD zhruba po dobu 3 sekund. V přijímači je toto nastavení přes grafické menu též umožněno.

Právě menu představuje další úpravu aplikace pro přijímací modul (RX). Po resetování modulu se na LCD zobrazovací objeví základní menu, ze kterého jde buďto tlačítkem SW1 provést měření pro nastavené parametry nebo se za pomocí tlačítka SW2 zanořit do nastavovacího menu (settings). V menu pro nastavení je možné přidávat k měření známý

útlum nebo právě nastavovat výstupní výkon vysílače – Pa. Návrat k základnímu menu je ve většine případů realizován stiskem tlačítka SW4.

V počátečních fázích měření byla využita původní aplikace, kdy docházelo k neustálému odesílání dat a zobrazování úrovně signálu. Hodnota na displeji však velice často kolísala a znesnadňovala tak odečet hodnot. Proto jsem se rozhodl provést pro jednotlivá měření vyslání padesáti paketů, kdy pro každý byla zjištěna hodnota úrovně signálu a po ukončení měření byl výsledek zprůměrován a zobrazen na LCD displeji.

5.3 Význam některých funkcí a proměnných

Následující řádky popisují základní funkce, proměnné a jiné důležité části programu.

Makra:

CHANNEL_NUMBER – uchovává číslo kanálu, na kterém oba moduly komunikují, implicitně nastaveno na „0“.

OUTPUT_POWER – uchovává implicitní hodnotu vysílacího výkonu, který se použije při inicializaci aplikace.

Nastavení vysílacího výkonu:

MAX_POWER – uchovává hodnotu maximálního možného vysílacího výkonu (hodnota „15“), odpovídá zhruba úrovni + 3 až + 5 dBm.

NOMINAL_POWER – uchovává hodnotu odpovídající vysílací úrovni 0 dBm (hodnota „11“).

MIN_POWER – uchovává hodnotu minimálního vysílacího výkonu (hodnota „0“), odpovídá zhruba úrovni – 16 dBm.

Fáze zobrazení:

MAIN_MENU – uživatel se nachází v hlavním menu aplikace.

MEASURE_IN_PROGRESS – značí právě probíhající měření.

MEASURE_ENDED – značí ukončení měření.

SETTINGS – uživatel se nachází v menu pro nastavení parametrů.

PA_SET – část menu pro nastavení vysílacího výkonu.

ADD_LOSS – část menu pro nastavení známého útlumu.

PA_SET_SAVE – uložení hodnoty vysílacího výkonu + návrat k MAIN_MENU.

PA_SET_CANCEL – stornování změn vysílacího výkonu + návrat k MAIN_MENU.

Fáze aplikace:

INITIAL_STATE – značí aplikaci ve fázi inicializace.
RESET_STATE – značí resetování modulu.
RECEIVER_ALWAYS_ON – aplikace vyčkává se zapnutým přijímačem.
WAITING_FOR_ACK – aplikace čeká na potvrzovací paket.
TX_STATE – aplikace se nachází ve stavu vysílání dat.
RX_STATE – aplikace se nachází ve stavu příjmu (např. čekání na přijetí ACK).
GOOD_PACKET – značí úspěšné přijetí posledního paketu.

Proměnné:

gi8AppStatus – typu *signed char*. Značí fázi, ve které se aplikace právě nachází.
faze_zobrazeni – typu *unsigned char*. Podle její hodnoty se provede zobrazení příslušné části menu na LCD displeji.
link_quality – typu *unsigned char*, uchovává změřenou hodnotu po volání funkce `MLMELinkQuality()`.
pa_nastavene – typu *unsigned char* s modifikátorem *static*. Uchovává hodnotu vysílacího výkonu.
pressedKeyExt – typu *unsigned char*. Uchovává hodnotu naposled stisknutého tlačítka.
retezec[16] – pole znaků (typ *unsigned char*) o velikosti 16. Pro uchování řetězce k zobrazení na LCD funkcí `LCDWriteString(par1, par2)`.
merene_hodnoty[50] – pole hodnot typu *unsigned char*, do kterého se ukládají změřené hodnoty `link_quality`.
pocet_opakovani – konstantní hodnota (modifikátor *const*) typu *unsigned char*. Značí počet úspěšně provedených odeslání paketů pro každé prováděné měření.
gau8TxDataBuffer[20] – pole znaků typu *unsigned char*, do kterého se ukládají data určená k odeslání.
gau8RxDataBuffer[20] – pole znaků typu *unsigned char*, do kterého se ukládají přijatá data.

Funkce:

`AppInit(void)` – návratová hodnota – funkce neobsahuje návratovou hodnotu (typ *void*).
– Vstupní parametry – bez vstupních parametrů.
– Význam – inicializace základních parametrů a periférií aplikace jako je nastavení pinů pro tlačítka, inicializace LCD displeje atd.

`int2string(par1, par2)` – návratová hodnota – funkce neobsahuje návratovou hodnotu (typ *void*).
– Vstupní parametry – `par1` typu *int*, `par2` typu *pole znaků unsigned char*.

- Význam – zajistí převod proměnné typu *int* zadané *par1* na řetězec znaků, který uloží do proměnné *par2*.

`LCDWriteString(par1, par2)` – návratová hodnota – funkce neobsahuje návratovou hodnotu (typ *void*).

- Vstupní parametry – *par1* typu *unsigned char*, *par2* typu *pole znaků unsigned char*.
- Význam – funkce zajišťuje výpis textu na LCD displej. V *par1* je předána hodnota řádku („1“ nebo „2“), na který se provede zápis a v proměnné *par2* je zadán text pro vypsaní. Text může být dlouhý maximálně 16 znaků.

`Menu(par1)` – návratová hodnota – funkce neobsahuje návratovou hodnotu (typ *void*).

- Vstupní parametry – jeden vstupní parametr typu *unsigned char*.
- Význam – na základě hodnoty proměnné *faze_zobrazeni* provede zobrazení příslušné části menu na LCD displeji. Funkce je volána cyklicky každých 16 ms jako obslužná funkce vnitřního přerušení od časovače 1.

`Mereni(void)` – návratová hodnota – funkce neobsahuje návratovou hodnotu (typ *void*).

- Vstupní parametry – bez vstupních parametrů.
- Význam – základem funkce je smyčka s počtem cyklů určených proměnnou počet opakování. Hodnota proměnné pro kontrolu počtu cyklů se však inkrementuje pouze v případě přijetí bezchybného paketu, čímž je zajištěno, že se provede počet měření definovaný v proměnné *pocet_opakovani*.

`MLMESetChannelRequest(par1)` – návratová hodnota – funkce je v aplikaci přetypována na *void*, tedy není využita.

- Vstupní parametry – jeden vstupní parametr typu *unsigned char*.
- Význam – na základě hodnoty makra *CHANNEL_NUMBER*, předaného jako vstupní parametr, provede nastavení čísla komunikačního kanálu. V aplikaci je implicitně nastavena hodnota „0“, tedy kanál na frekvenci 2,405 GHz.

`MLMELinkQuality(void)` – návratová hodnota – funkce vrací hodnotu typu *unsigned char*.

- Vstupní parametry – bez vstupních parametrů.
- Význam – zjistí hodnotu posledního změřeného LQI pro přijatý paket.

`MLMEMC13192PAOutputAdjust(par1)` – návratová hodnota – funkce je v aplikaci přetypována na *void*, tedy návratová hodnota není využita.

- Vstupní parametry – jeden vstupní parametr typu *unsigned char*.

- Význam – na základě hodnoty některého z maker nebo zadáním dekadické hodnoty v rozsahu „0“ – „15“ jako vstupní parametr funkce nastaví vysílací výkon. V aplikaci je implicitně nastavena hodnota NOMINAL_POWER („11“).

MLMEMC13192ResetIndication() – návratová hodnota – funkce neobsahuje návratovou hodnotu (typ *void*).

- Vstupní parametry – bez vstupních parametrů.
- Význam – funkce zajišťuje chování aplikace v případě resetování modulu.

Zjistí_vzdálenost(par1, par2) – návratová hodnota – vrací proměnnou typu *unsigned char*.

- Vstupní parametry – hodnota změřeného LQI (par1) a nastavený vysílací výkon (par2).
- Význam – na základě nastavených parametrů a změřené hodnoty LQI vrací odhad vzdálenosti mezi oběma moduly.

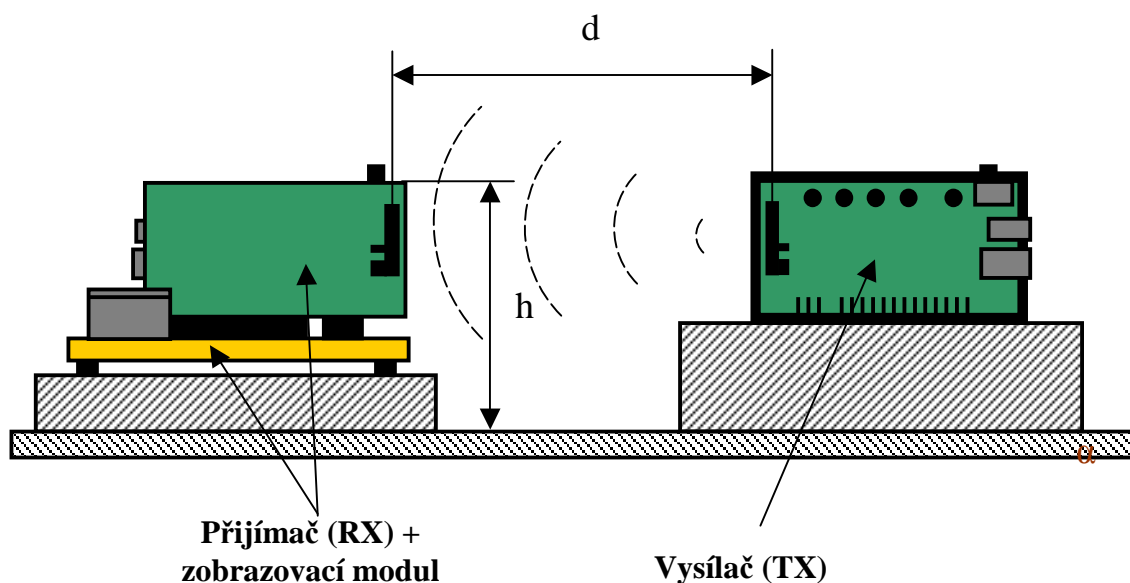
6 Měření

Pro vytvoření převodní tabulky nebo algoritmu pro odhad vzdálenosti jsem nejdříve musel zjistit charakteristické hodnoty, které se objevují při měření v terénu, abych na základě toho mohl přizpůsobit chování původní aplikace. Bylo nutné odzkoušet například vliv natočení obou ZigBee modulů na kvalitu příjmu posílaných paketů. Všechny změřené hodnoty a charakteristiky se nacházejí v tabulkách a grafech, které jsou součástí následujících kapitol nebo přílohy na CD.

Většina prováděných pokusů probíhala podle rozestavení elementů, jehož princip je načrtnut na obrázku 6.1. Vysílací modul byl ponechán v plastové krabici od výrobce a napájen dvěma alkalickými bateriemi 1,5 V. Příjímač byl vyjmut z dodávané krabčky a instalován do zobrazovacího modulu. Ve vnitřních prostorách bylo napájení zobrazovače spolu s instalovaným přijímačem realizováno síťovým napětím 220 V. Pro případ měření bez dosahu sítě 220 V postačila k napájení alkalická baterie 9 V.

6.1 Uvnitř objektu

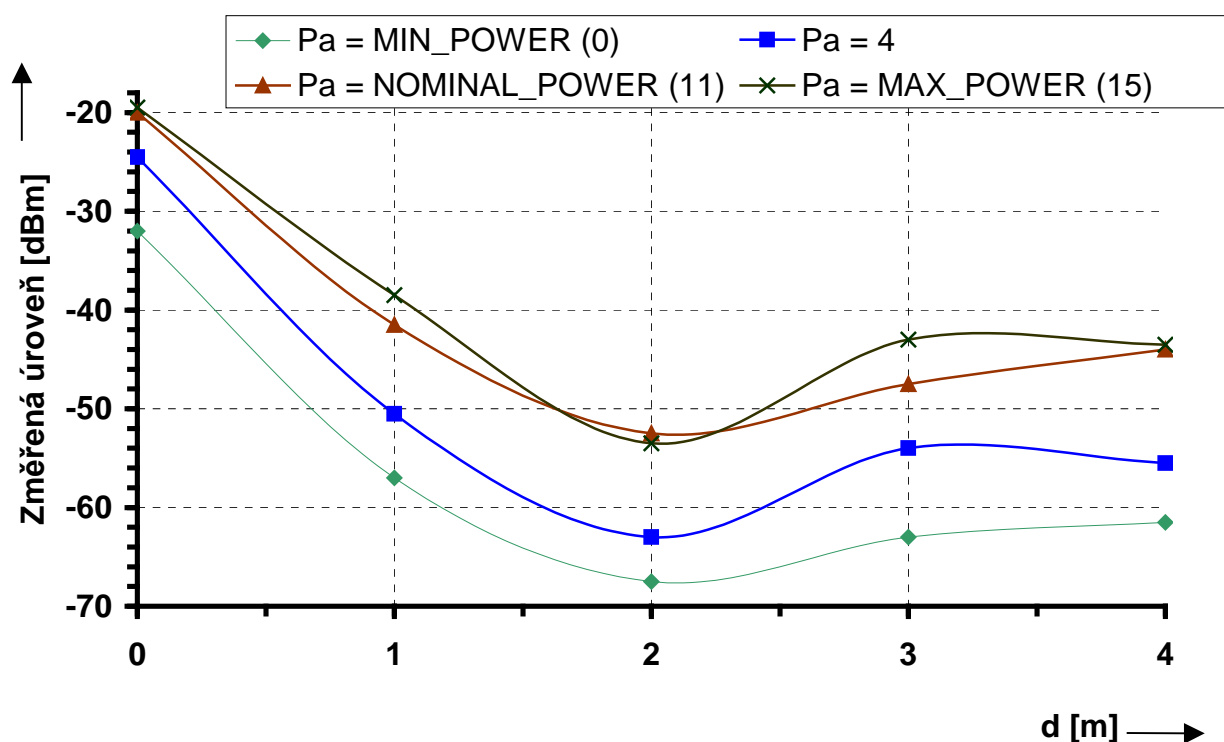
6.1.1 Měření vzdálenosti



Obr. 6.1: Nákres měřicí metody (měření vzdálenosti, pohled ze strany).

Tab. 6.1: Změřené hodnoty signálu v závislosti na vzdálenosti uvnitř obytné místnosti.
 $h = 34 \text{ cm}$, $\alpha = 0^\circ$;

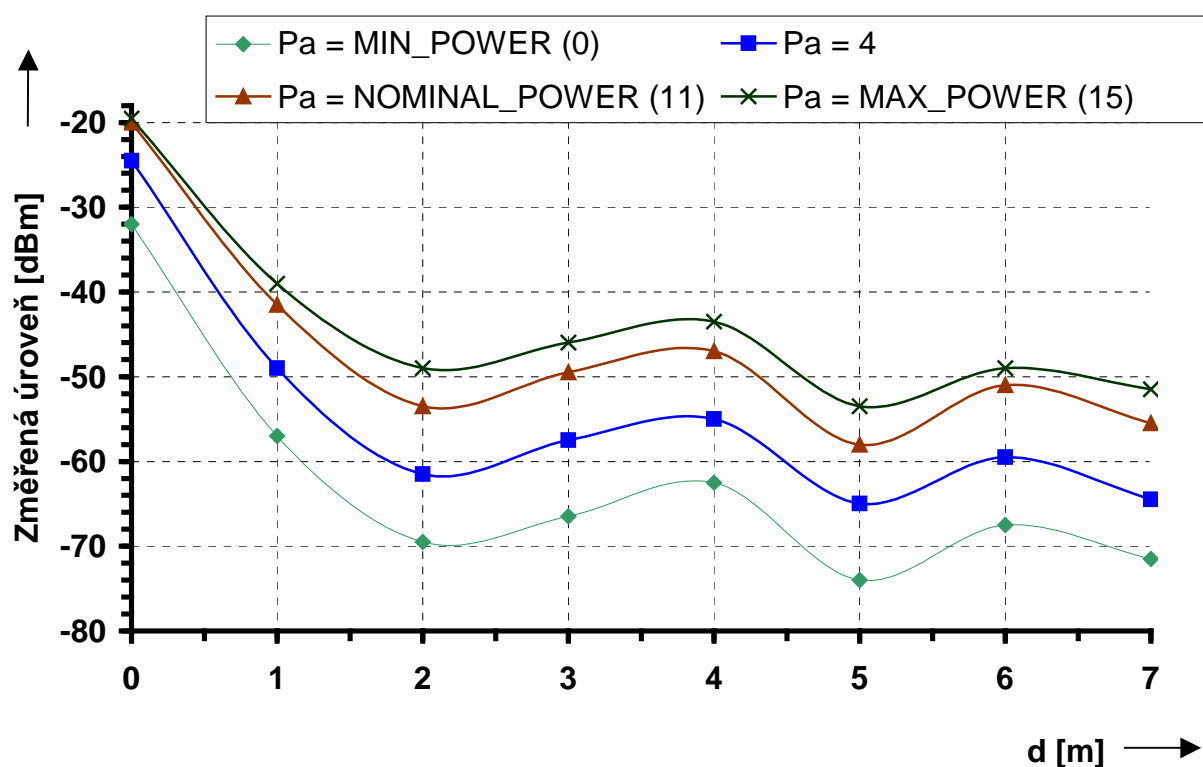
d [m]	0	1	2	3	4
Pa [-]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]
0	-32,0	-57,0	-67,5	-63,0	-61,5
1	-31,5	-56,5	-69,5	-63,0	-60,5
2	-31,5	-57,5	-67,5	-62,0	-61,0
3	-31,0	-57,5	-70,0	-64,0	-60,5
4	-24,5	-50,5	-63,0	-54,0	-55,5
5	-24,5	-50,5	-66,0	-56,0	-54,5
6	-24,0	-50,0	-62,0	-55,5	-53,0
7	-23,5	-48,0	-60,5	-56,0	-51,5
8	-20,0	-45,0	-57,5	-48,5	-48,0
9	-20,0	-44,0	-52,0	-48,0	-49,0
10	-20,0	-45,5	-55,0	-47,0	-46,0
11	-20,0	-41,5	-52,5	-47,5	-44,0
12	-19,5	-39,0	-52,5	-45,0	-44,0
13	-19,5	-38,5	-51,5	-46,0	-43,0
14	-19,5	-39,5	-53,5	-43,0	-41,5
15	-19,5	-38,5	-53,5	-43,0	-43,5



Obr. 6.2: Graf závislosti změřené úrovně signálu na vzdálenosti uvnitř obytné místnosti.

Tab. 6.2: Změřené hodnoty signálu v závislosti na vzdálenosti uvnitř garáže.
 $h = 34 \text{ cm}$, $\alpha = 0^\circ$;

d [m]	0	1	2	3	4	5	6	7
Pa [-]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]
0	-32,0	-57,0	-67,5	-63,0	-61,5	-67,5	-63,0	-61,5
1	-31,5	-56,5	-69,5	-63,0	-60,5	-69,5	-63,0	-60,5
2	-31,5	-57,5	-67,5	-62,0	-61,0	-67,5	-62,0	-61,0
3	-31,0	-57,5	-70,0	-64,0	-60,5	-70,0	-64,0	-60,5
4	-24,5	-50,5	-63,0	-54,0	-55,5	-63,0	-54,0	-55,5
5	-24,5	-50,5	-66,0	-56,0	-54,5	-66,0	-56,0	-54,5
6	-24,0	-50,0	-62,0	-55,5	-53,0	-62,0	-55,5	-53,0
7	-23,5	-48,0	-60,5	-56,0	-51,5	-60,5	-56,0	-51,5
8	-20,0	-45,0	-57,5	-48,5	-48,0	-57,5	-48,5	-48,0
9	-20,0	-44,0	-52,0	-48,0	-49,0	-52,0	-48,0	-49,0
10	-20,0	-45,5	-55,0	-47,0	-46,0	-55,0	-47,0	-46,0
11	-20,0	-41,5	-52,5	-47,5	-44,0	-52,5	-47,5	-44,0
12	-19,5	-39,0	-52,5	-45,0	-44,0	-52,5	-45,0	-44,0
13	-19,5	-38,5	-51,5	-46,0	-43,0	-51,5	-46,0	-43,0
14	-19,5	-39,5	-53,5	-43,0	-41,5	-53,5	-43,0	-41,5
15	-19,5	-38,5	-53,5	-43,0	-43,5	-53,5	-43,0	-43,5



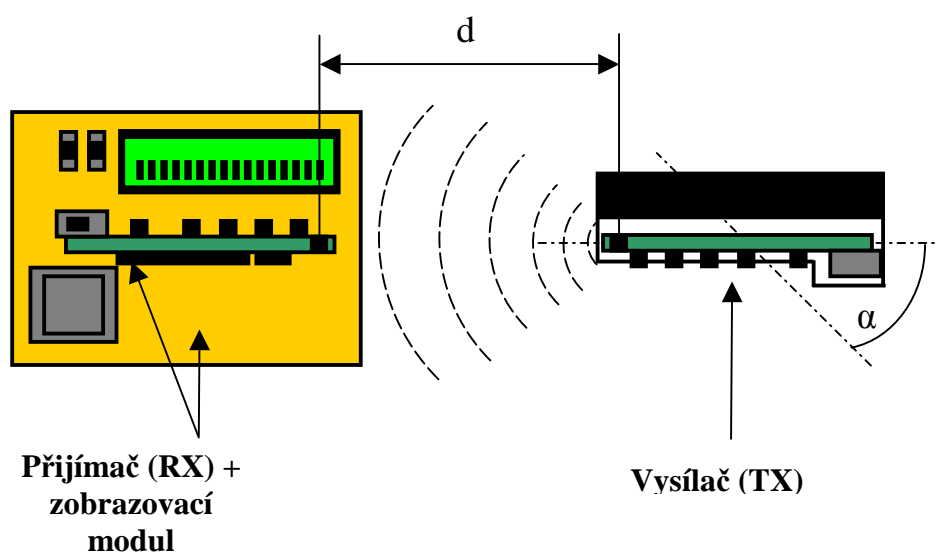
Obr. 6.3: Graf závislosti změřené úrovně signálu na vzdálenosti uvnitř garáže.

Výsledkem bylo bohužel zjištění, že hodnota úrovně přijímaného signálu je závislá na několika faktorech, které při měření v místnostech nelze nikdy bez předchozích zkušebních měření určit. Zřejmě odrazy od okolních předmětů a zdi způsobují při konstantní vzdálenosti a jen mírně odlišných podmínkách (natočení jednoho z modulů, změny rozestavení předmětů, pouhé otevření dveří) zcela odlišné hodnoty. Dále je měření nepříznivě ovlivňováno například pohybem osob nebo libovolnou změnou umístění věcí – například nábytku atd. Dospěl jsem tedy k závěru, že pro odhad vzdálenosti uvnitř objektů je metoda založená pouze na zjištění úrovně přijímaného signálu nevhodná.

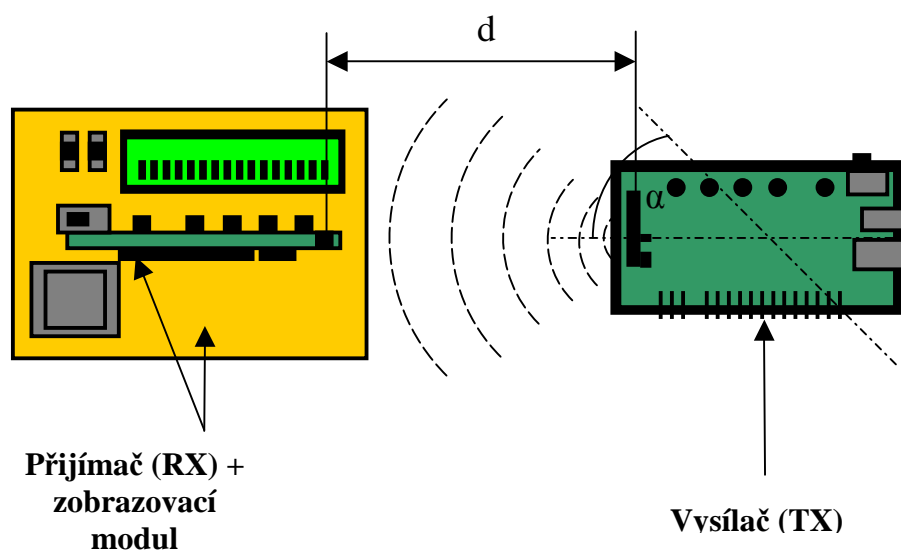
6.2 Ve volném terénu

6.2.1 Vliv vzájemného natočení modulů

Při měření ve venkovních prostorách jsem se nejdříve snažil zjistit, zda má na změřenou úroveň vliv vzájemné natočení modulů. Měření byla prováděna na volném prostranství, ve kterém by teoreticky mělo docházet k nežádoucím odrazům pouze od zemského povrchu. Proměřil jsem celkem tři případy pozice modulů. Princip metod měření je možné shlédnout na obrázcích 6.4, 6.5 respektive 6.8. Vzdálenost mezi bezdrátovými moduly d činila 2,5 m a úhel α se měnil po 15° od 0° do 345° . Vysílací výkon obou vysílačů byl softwarově nastaven na dvě hodnoty – minimální možný výkon (MIN_POWER – „0“) a maximální možný výkon (MAX_POWER – „15“). Výsledky měření jsou zaneseny v tabulkách 6.3, 6.4 a grafech 6.6, 6.7 a 6.9.



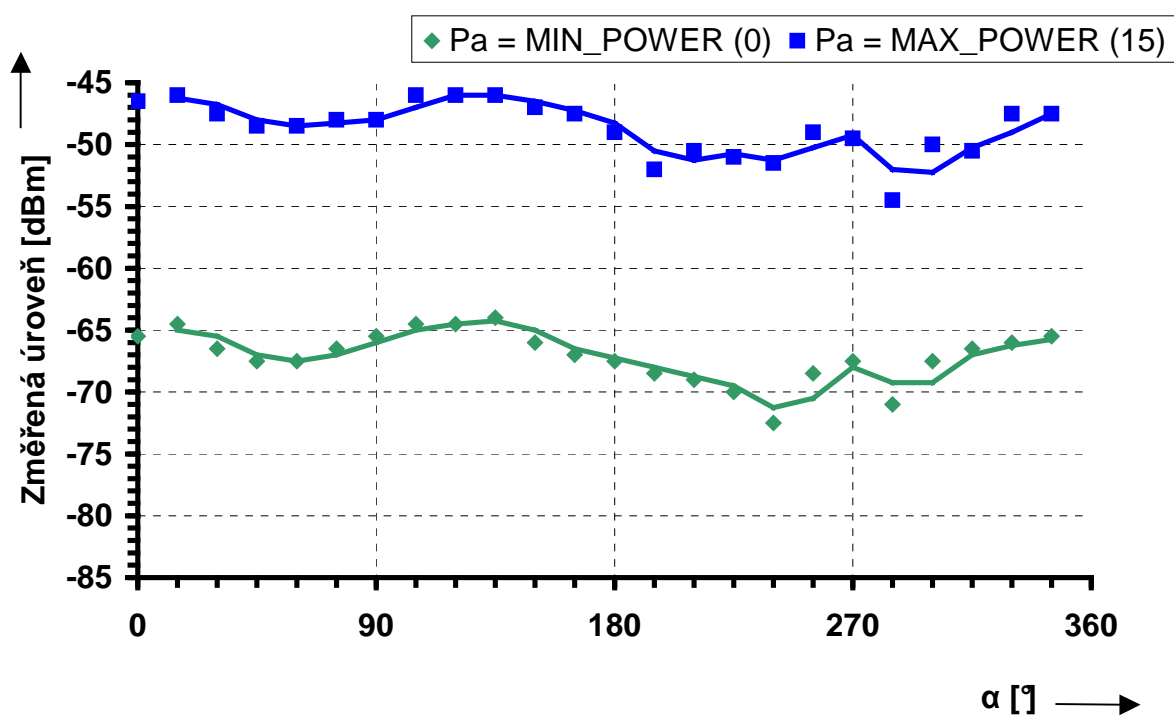
Obr. 6.4: Měření vlivu vzájemného natočení modulů metodou 1 (pohled shora).



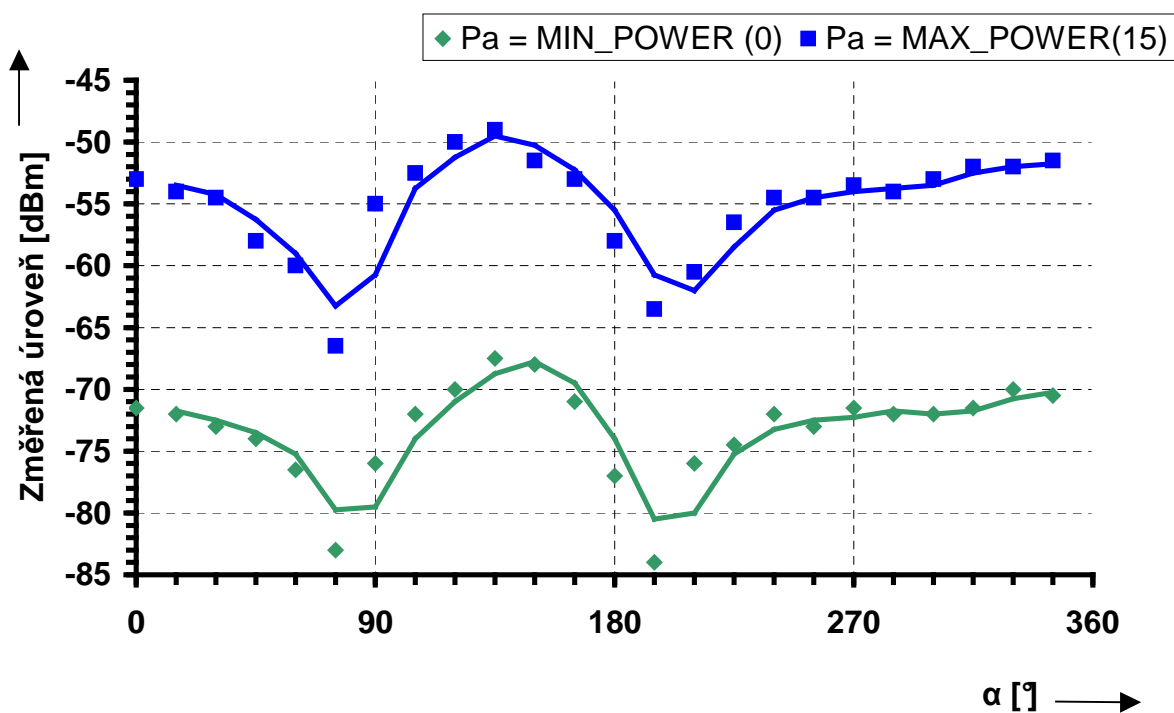
Obr. 6.5: Měření vlivu vzájemného natočení modulů metodou 2 (pohled shora).

Tab. 6.3: Změřené hodnoty signálu v závislosti na natočení vysílače (u metod 1 a 2).
d = 2,5 m, h = 34 cm;

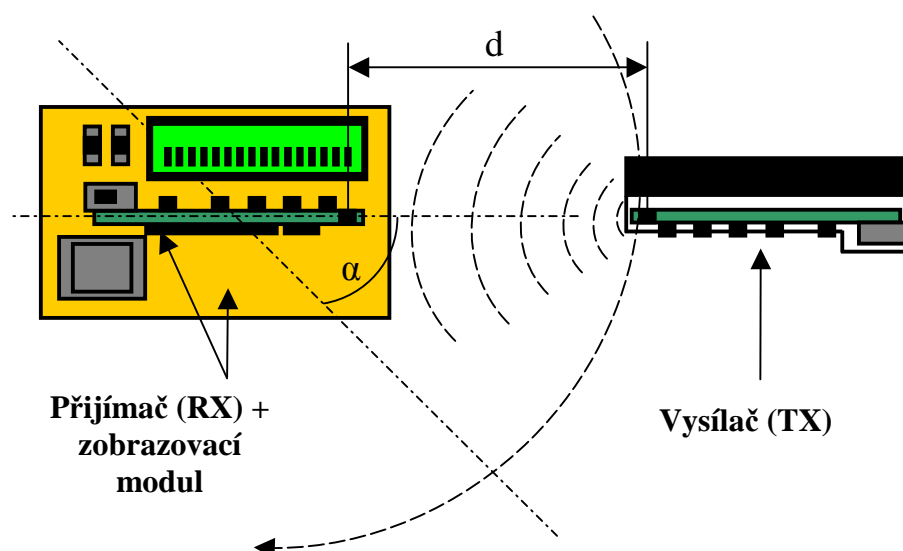
Pozice vysílače	viz obr. 6.4		viz obr. 6.5	
Pa	MIN_POWER	MAX_POWER	MIN_POWER	MAX_POWER
α [°]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]
0	-65,5	-46,5	-71,5	-53,0
15	-64,5	-46,0	-72,0	-54,0
30	-66,5	-47,5	-73,0	-54,5
45	-67,5	-48,5	-74,0	-58,0
60	-67,5	-48,5	-76,5	-60,0
75	-66,5	-48,0	-83,0	-66,5
90	-65,5	-48,0	-76,0	-55,0
105	-64,5	-46,0	-72,0	-52,5
120	-64,5	-46,0	-70,0	-50,0
135	-64,0	-46,0	-67,5	-49,0
150	-66,0	-47,0	-68,0	-51,5
165	-67,0	-47,5	-71,0	-53,0
180	-67,5	-49,0	-77,0	-58,0
195	-68,5	-52,0	-84,0	-63,5
210	-69,0	-50,5	-76,0	-60,5
225	-70,0	-51,0	-74,5	-56,5
240	-72,5	-51,5	-72,0	-54,5
255	-68,5	-49,0	-73,0	-54,5
270	-67,5	-49,5	-71,5	-53,5
285	-71,0	-54,5	-72,0	-54,0
300	-67,5	-50,0	-72,0	-53,0
315	-66,5	-50,5	-71,5	-52,0
330	-66,0	-47,5	-70,0	-52,0
345	-65,5	-47,5	-70,5	-51,5



Obr. 6.6: Graf změřených hodnot při vzájemném natočení modulů – metoda 1.



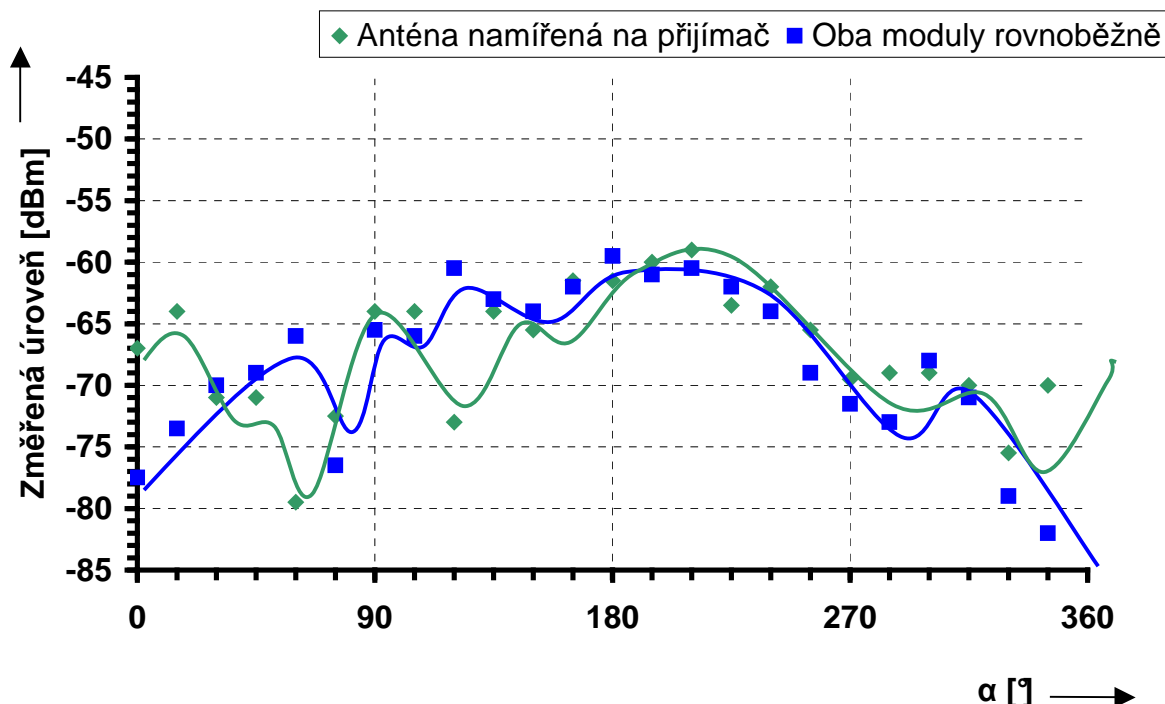
Obr. 6.7: Graf změřených hodnot při vzájemném natočení modulů – metoda 2.



Obr. 6.8: Měření vlivu vzájemného natočení modulů metodou 3 (pohled shora).

Tab. 6.4: Změřené hodnoty signálu v závislosti na natočení vysílače (metoda 3).
d = 2,5 m, h = 34 cm;

Pozice vysílače	viz obr. 6.8	
Pa	MAX_POWER	MAX_POWER
α [°]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]
0	-67,0	-77,5
15	-64,0	-73,5
30	-71,0	-70,0
45	-71,0	-69,0
60	-79,5	-66,0
75	-72,5	-76,5
90	-64,0	-65,5
105	-64,0	-66,0
120	-73,0	-60,5
135	-64,0	-63,0
150	-65,5	-64,0
165	-61,5	-62,0
180	-61,5	-59,5
195	-60,0	-61,0
210	-59,0	-60,5
225	-63,5	-62,0
240	-62,0	-64,0
255	-65,5	-69,0
270	-69,5	-71,5
285	-69,0	-73,0
300	-69,0	-68,0
315	-70,0	-71,0
330	-75,5	-79,0
345	-70,0	-82,0



Obr. 6.9: Graf změřených hodnot při vzájemném natočení modulů – metoda 3.

Anténa typu „F“ na tištěném spoji bezdrátového modulu má v horizontální rovině všesměrovou charakteristiku. Pro přímou viditelnost mezi anténou vysílače a přijímače by tedy teoreticky natočení modulu vysílače při vertikální poloze antény nemělo mít vliv na změřenou hodnotu úrovně signálu. Tabulka 6.3 však dokazuje, že na úhlu natočení vysílacího modulu oproti přijímacímu modulu záleží a rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou může činit až 8,5 dB v případě minimálního i maximálního nastaveného výkonu vysílače.

Druhý měřicí pokus probíhal pro situování vysílacího modulu do horizontální polohy (Přirozená poloha ZigBee modulu v instalované krabici dnem dolů). Z teoretického hlediska by měly být změřené hodnoty o něco nižší než v předchozím případě, což bylo potvrzeno. Důkaz obsahuje tabulka 6.4 a z ní vycházející graf na obrázku 6.9. V krajním případě může rozdíl mezi změřenými hodnotami způsobený vzájemným natočením modulů činit až 22,5 dB.

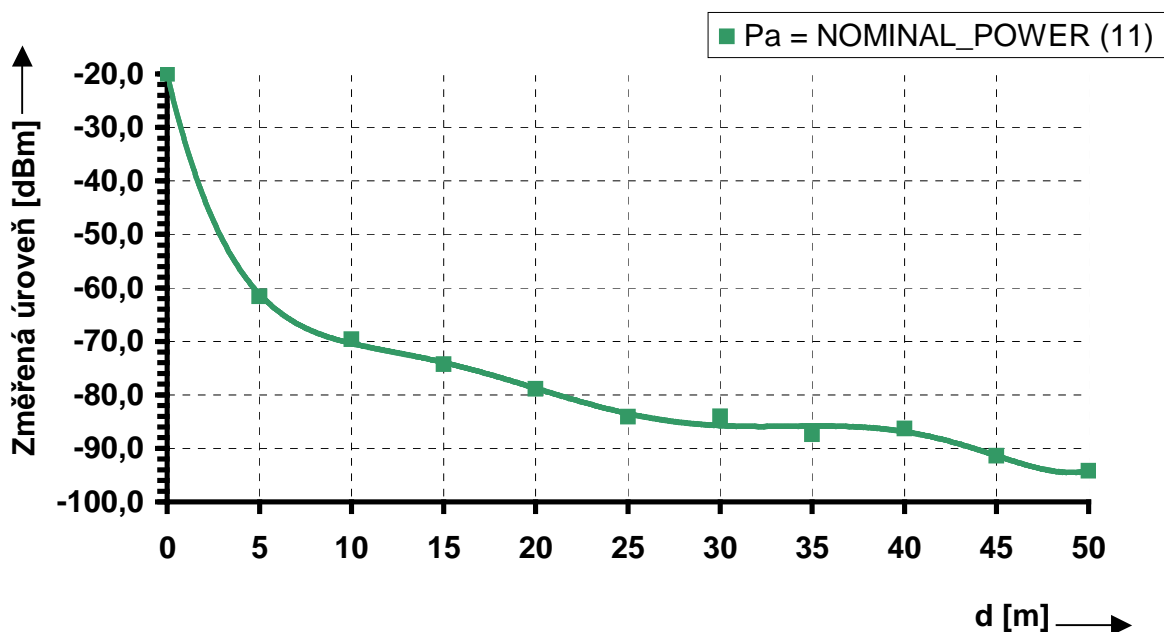
Důležitý poznatek z tohoto měření je, že nejvýhodnější poloha vysílacího ZigBee modulu oproti přijímači zasunutém v zobrazovacím modulu je obecně taková, kdy jsou na sebe namířeny obě antény na deskách (tedy úhel α činí 0°) a vysílač je situován do vertikální polohy (dno plastové krabice se ZigBee modulem natočeno do strany a boční strana se spínačem on/off míří vzhůru). Zmíněnou pozici bude výhodné používat při dalších měřeních. Konečný závěr měření podložený změřenými hodnotami ukazuje, že přesnost případného zjišťování vzdálenosti bude negativně ovlivněna i vzájemným natočením obou modulů.

6.2.2 Měření vzdálenosti

Venkovní měření vzdálenosti probíhalo celkem ve třech mírně odlišných lokalitách. Pro všechna měření však byly některé aspekty společné. Výška modulů nad zemí byla stále udržována na hodnotě $h = 34$ cm a úhel natočení $\alpha = 0^\circ$. Měření byla prováděna na rovném povrchu s minimální přítomností cizích těles, od kterých by mohly vznikat nežádoucí odrazy. První měření proběhlo na lánu pole a s použitím původní neupravené aplikace (jedinou úpravou bylo zobrazení měřených hodnot na LCD displeji).

Tab. 6.5: Měření závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (1).
 $h = 34$ cm, $\alpha = 0^\circ$, $P_a = \text{NOMINAL_POWER}$ (11);

d [m]	Změřená úroveň [dBm]
0	-20,0
5	-61,6
10	-69,6
15	-74,3
20	-78,9
25	-84,1
30	-84,0
35	-87,4
40	-86,3
45	-91,4
50	-94,2

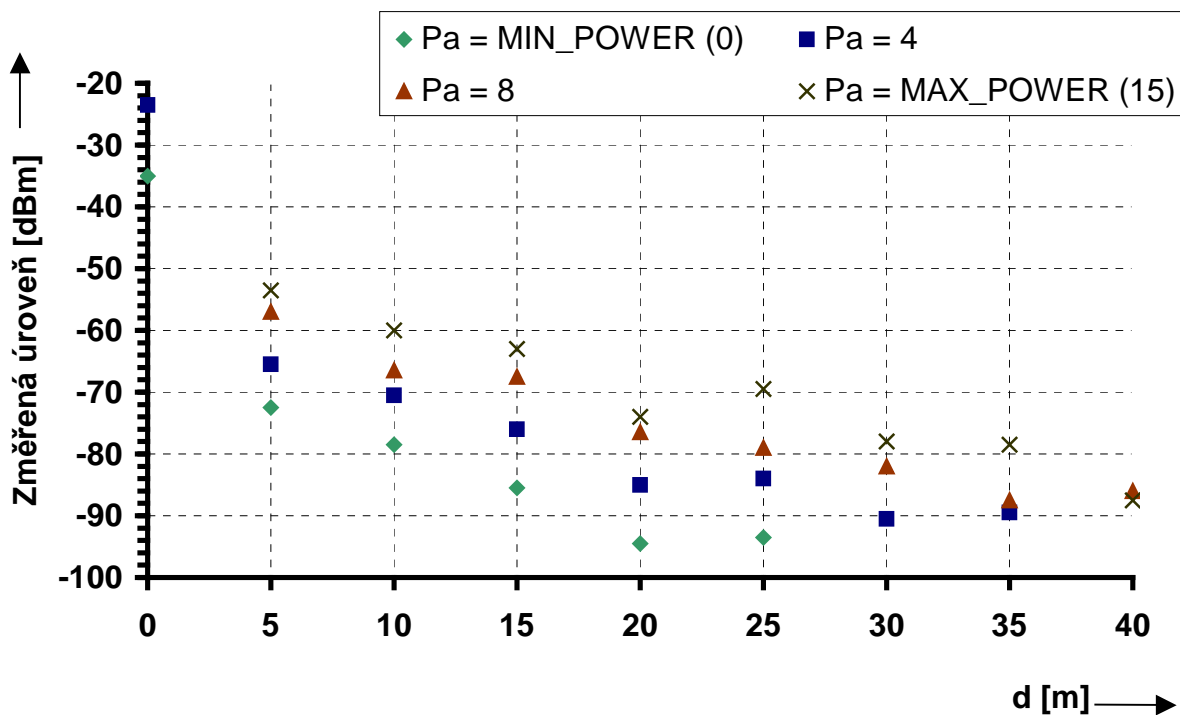


Obr. 6.10: Graf závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (1).

Druhé měření bylo realizováno na asfaltovém povrchu (omezená délka mezi moduly $h = 40$ m) a již s upravenou verzí aplikace. Výsledky všech měření zobrazují následující tabulky a grafy. Pro přehlednost uvádím změřené hodnoty s krokem 5 m. Všechny naměřené hodnoty si lze prohlédnout v excelovském souboru v příloze na CD. Z důvodu čitelnosti jsem změřené hodnoty neprokládal křivkou.

Tab. 6.6: Měření závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (2).
 $h = 34$ cm, $\alpha = 0^\circ$, hodnota „x“ znamená ztrátu spojení;

Pa [-]	MIN_POWER (0)	4	8	MAX_POWER (15)
d [m]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]
0	-35,0	-23,5	-19,5	-19,5
5	-72,5	-65,5	-57,0	-53,5
10	-78,5	-70,5	-66,5	-60,0
15	-85,5	-76,0	-67,5	-63,0
20	-94,5	-85,0	-76,5	-74,0
25	-93,5	-84,0	-79,0	-69,5
30	x	-90,5	-82,0	-78,0
35	x	-89,5	-87,5	-78,5
40	x	x	-86,0	-87,5



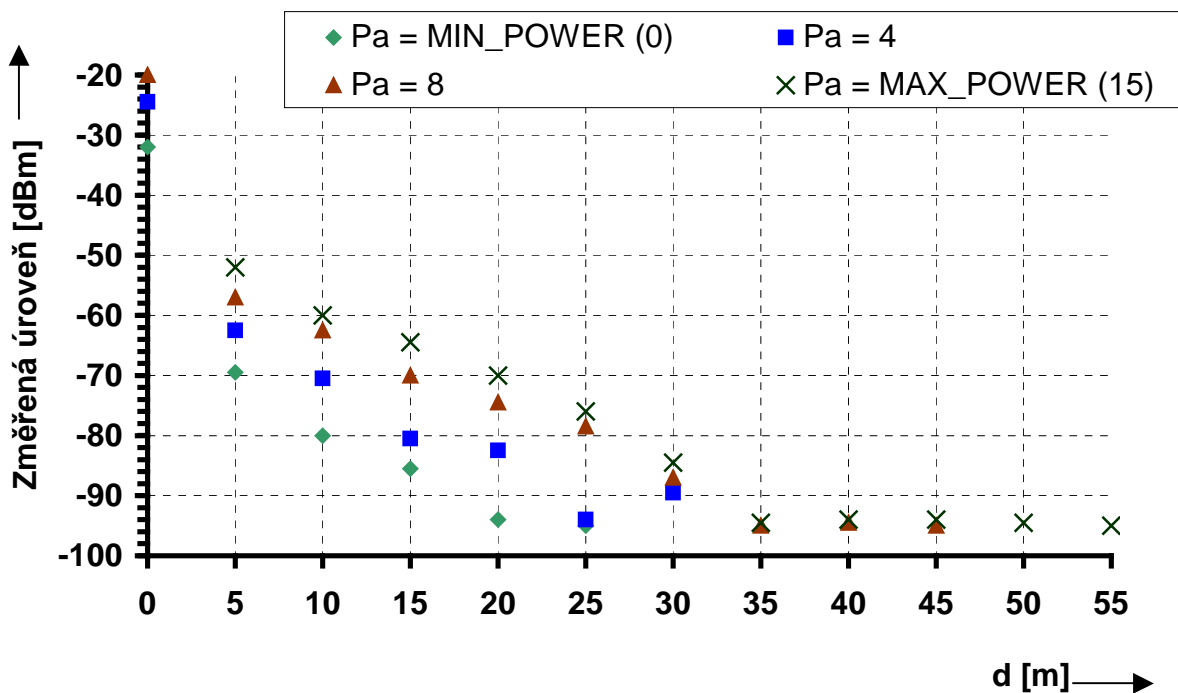
Obr. 6.11: Graf závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (2).

Konečné třetí měření proběhlo na travnatém povrchu se zachováním všech předchozích parametrů měření. Aplikace byla dále mírně upravena zobrazením hraničních hodnot pro jednotlivá měření.

Tab. 6.7: Měření závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (3).

$h = 34 \text{ cm}$, $\alpha = 0^\circ$, hodnota „x“ znamená ztrátu spojení;

Pa [-]	MIN_POWER (0)	4	8	MAX_POWER (15)
d [m]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]	Změřená úroveň [dBm]
0	-32,0	-24,5	-20,0	-19,5
5	-69,5	-62,5	-57,0	-52,0
10	-80,0	-70,5	-62,5	-60,0
15	-85,5	-80,5	-70,0	-64,5
20	-94,0	-82,5	-74,5	-70,0
25	-95,0	-94,0	-78,5	-76,0
30	x	-89,5	-87,0	-84,5
35	x	x	-95,0	-94,5
40	x	x	-94,5	-94,0
45	x	x	-95,0	-94,0
50	x	x	x	-94,5
55	x	x	x	-95,0



Obr. 6.12: Graf závislosti úrovně přijatého signálu na vzdálenosti modulů (3).

6.2.3 Vliv výšky na měření

Pro jednotlivá měření vzdálenosti vycházejí poměrně odlišné hodnoty. Při zkoumání důvodu jsem odhalil další nepříjemnou skutečnost. Hodnota intenzity přijímaného signálu dosahuje velkého rozptylu i při nastavení různé výšky modulů nad zemí. Například změřená hodnota pro vzdálenost modulů $d = 10$ m a nastaveném minimálním výkonu vysílače je rovna při výšce $h = 34$ cm – 80 dBm. Při změně výšky h se při zachování stejné vzdálenosti hodnoty liší až o 11 dB. Tento negativní jev je zřejmě způsoben odrazy signálu od zemského povrchu.

Také maximální dosah modulů závisí na výšce, ve které se nachází vysílač i přijímač. Například při nastaveném výkonu vysílače – 16 dBm (MIN_POWER) ukázalo měření maximální dosah při $h = 34$ cm přibližně 25 m. Ve výšce $h = 200$ cm však došlo k přenosu dat i na vzdálenost rovnou 80 metrům.

Závěr

V počátečních fázích práce jsem nastudoval problematiku bezdrátové komunikace se zaměřením na architekturu systémů na bázi IEEE 802.15.4 i s nádstavbou ZigBee. V prvních dvou kapitolách jsem se pokusil o stručné shrnutí uvedených standardů a principů komunikace v ZigBee bezdrátové síti se zaměřením na procesy probíhající na fyzické a MAC vrstvě. Z datasheetů bylo nutné vyčíst, které registry mikrokontroléru se používají k uložení důležitých dat souvisejících s kvalitou přijímaného signálu. Následoval návrh a realizace uživatelského rozhraní pro zobrazení dat na LCD displej spolu s výběrem vhodné aplikace, která byla upravena pro účely vyčítání a zobrazování dat. Stěžejní částí celé práce byla měření v terénu za účelem zjištění dosahovaných hodnot, která měla ukázat přesnost nebo případně použitelnost zadaného experimentu v praxi.

Na základě provedených měřicích pokusů uvnitř budov bylo zřejmé, že výsledek měření je vždy zatížen velkými chybami, které jsou způsobeny četnými odrazy signálu v uzavřených prostorách. Při dodržení konstantní výšky a přímé viditelnosti mezi moduly se chyba měření pohybovala v rozsahu $\pm 2\text{dB}$ pro identické prostory. Při jakékoliv změně podmínek měření (změna výšky modulů, natočení, nesplnění podmínky přímé viditelnosti, změna místnosti) se však změřená hodnota pohybovala v rozsahu až 10dB pro identickou vzdálenost modulů. Takovýto rozdíl mezi změřenými hodnotami pro konstantní vzdálenost má za následek nemožnost jakéhokoliv odhadu vzdálenosti mezi moduly v uzavřených prostorách.

Venkovní měření ukázala také vliv spousty faktorů, které by měly ve výsledku negativní dopad na převod signálové úrovně na vzdálenost. Pokud pominu změnu prostředí měření a případné odrazy signálu od okolních předmětů, pak největší chyba měření úrovně signálu pro nastavení konstantní vzdálenosti vznikala při změně výšky bezdrátových modulů. Důkazem budiž provedené měření dosahu modulů. Pro nejnižší nastavený výkon vysílače byl dosah zařízení ve výšce $h = 34\text{ cm}$ zhruba 25 m . Ve výšce $h = 2\text{ m}$ došlo však k přenosu dat a změřením úrovně signálu i na vzdálenost 80 m . Ve výsledku je tedy rozdíl vzdálenosti pro hraniční úroveň signálu -95 dBm zhruba 55 m . Uvedené difference zjevně závisí na příjmu odražených signálů. Přijatá úroveň intenzity signálu také závisí na vzájemném natočení obou modulů. V krajních případech může natočení způsobovat rozdíl až $22,5\text{ dB}$. Po započtení všech popsanych vlivů na konečnou přesnost měření vzdálenosti je tedy zjevné, že ani pro venkovní měření není možné vzdálenost odhadnout s uspokojivou přesností.

Závěrem prováděného experimentu je bohužel zjištění, že hrubé měření vzdálenosti pouze na základě intenzity přijímaného signálu poskytuje neuspokojivé a nestálé výsledky zatížené ve většině případů velkými odchylkami změřených hodnot. Proto není možné s dostatečnou přesností navrhnout převodní funkci nebo tabulku, která by umožňovala použití metody v praxi a to jak pro exteriérová, tak pro interiérová měření.

Literatura

Odborné publikace:

- [1] FARAHANI, S. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes, London, 2008. ISBN 0750683937
- [2] QIAN K., HARING D., CAO L. *Embedded Software Development with C*. Springer, New York, 2009. ISBN 1441906053
- [3] MATOUŠEK, David. *Práce s inteligentními displeji LCD : 1. díl - znakové a grafické displeje, přípravy a programy*. 1. vydání. Praha : BEN – technická literatura, 2006. 224 s. ISBN 80-7300-121-7

Elektronické články:

- [4] BRADÁČ, Zdeněk. *Bezdrátový komunikační standard ZigBee. Automatizace* [online]. Duben 2005, 48, č. 4, [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=638>>.
- [5] KOTON, J.; ČÍKA, P.; KŘIVÁNEK, V. *Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee. Acces Server* [online]. 18. 04. 2006, č. 1, [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW : <<http://access.feld.cvut.cz/view.php>>.
- [6] KYSILKA, Radek. *ZigBee. Lupa* [online]. 22. 8. 2003, č. 1, [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW : <<http://www.lupa.cz/clanky/zigbee/>>.

Manuály ve formátu .pdf dostupné z internetu:

- [7] *BeeKit Wireless Connectivity Toolkit : Quick Start Guide* [online]. Rev. 1.9. [s.l.] : © Freescale Semiconductor, Inc., 09/2009 [cit. 2010-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/user_guide/BKWCTKUG.pdf>.
- [8] *Freescale BeeStack™ : Application Development Guide* [online]. Rev. 1.1. [s.l.] : © Freescale Semiconductor, Inc., 01/2008 [cit. 2010-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/user_guide/BSADG.pdf>.
- [9] *Freescale Platform : Reference Manual* [online]. Rev. 1.0. [s.l.] : © Freescale Semiconductor, Inc., 01/2008 [cit. 2010-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/ref_manual/FSPRM.pdf>.

- [10] *MC1321x Evaluation Kit (EVK) : Reference Manual* [online]. Rev. 1.2. [s.l.] : © Freescale Semiconductor, Inc., 04/2008 [cit. 2010-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/ref_manual/MC1321xEVKRM.pdf>.
- [11] *MC1319x, MC1320x, and MC1321x Demonstration Operation : Running SMAC Based Demonstration Operations* [online]. Rev. 1.2. [s.l.] : © Freescale Semiconductor, Inc., 03/2008 [cit. 2010-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/app_note/AN3231.pdf>.
- [12] *MC1321x Reference Manual* [online]. Rev. 1.6. [s.l.] : © Freescale Semiconductor, Inc., 05/2010 [cit. 2010-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/ref_manual/MC1321xRM.pdf>.
- [13] *Simple Media Access Controller (SMAC) : User's Guide* [online]. Rev. 1.5. [s.l.] : © Freescale Semiconductor, Inc., 03/2008 [cit. 2010-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/user_guide/SMACRM.pdf>.

Seznam použitých zkratk

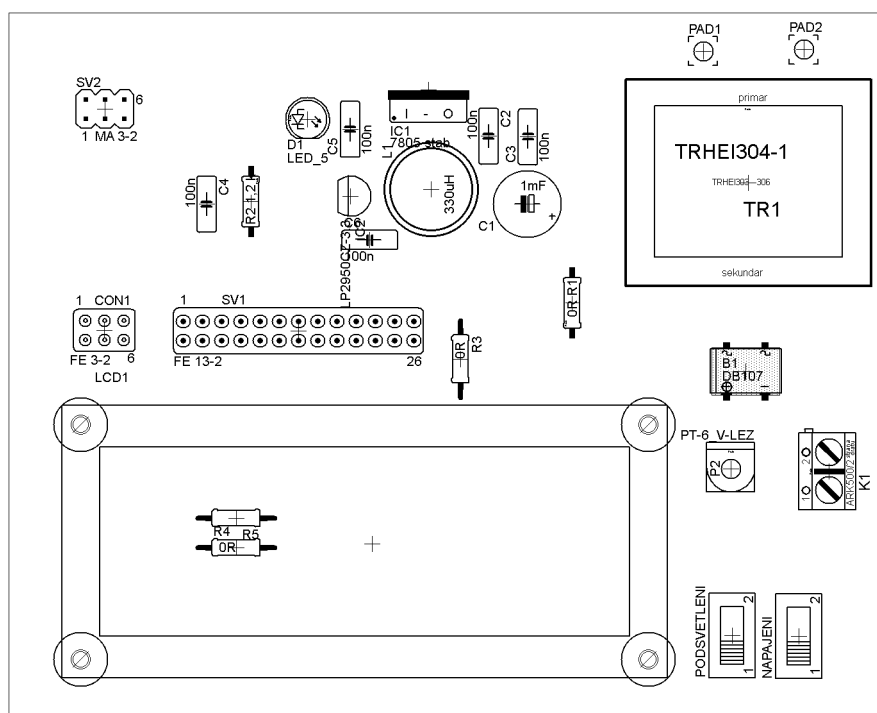
ADC	– Analog to Digital Converter
APL	– Application Layer
BCD	– Binary Coded Decimal
BDM	– Background Debug Mode
CCA	– Clear Channel Assessment
CD	– Compact Disc
CPU	– Central Processing Unit
CS	– Carrier Sense
CSMA/CA	– Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
DC	– Direct Current
DPS	– Deska plošných spojů
ED	– Energy Detection
FFD	– Full Functionality Device
GPIO	– General Purpose Input / Output
GTS	– Guaranteed Time Slot
GUI	– Graphical User Interface
IDE	– Integrated Development Environment
IEEE	– The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIC	– Inter-Integrated Circuit
ISM	– Industrial, Scientific and Medical
KBI	– KeyBoard Interrupt
KERS	– Kinetic Energy Recover System
LCD	– Liquid Crystal Display
LDO	– Low-DropOut Oscillator
LED	– Light-Emitting Diode
LGA	– Land Grid Array
LLC	– Logical Link Control
LQI	– Link Quality Indicator
MAC	– Medium Access Control
MCU	– MicroController Unit
MLME	– MAC Layer Management Entity
NWK	– NetWork layer
O-QPSK	– Offset Quaternary Phase Shift Keying
OSI	– Open Systems Interconnection
PAN	– Personal Area Networks
PLME	– Physical Layer Management Entity
RAM	– Random Access Memory
RF	– Radio Frequency
RFD	– Reduced Functionality Device

RSS	– Received Signal Strength
SCI	– Serial Communications Interface
SMAC	– Simple Medium Access Control
SNR	– Signal-to-Noise-Ratio
SPI	– Serial Peripheral Interface
SRB	– Sensor Reference Board
USB	– Universal Serial Bus
VCO	– Voltage-Controlled Oscillator
ZDO	– ZigBee Device Object

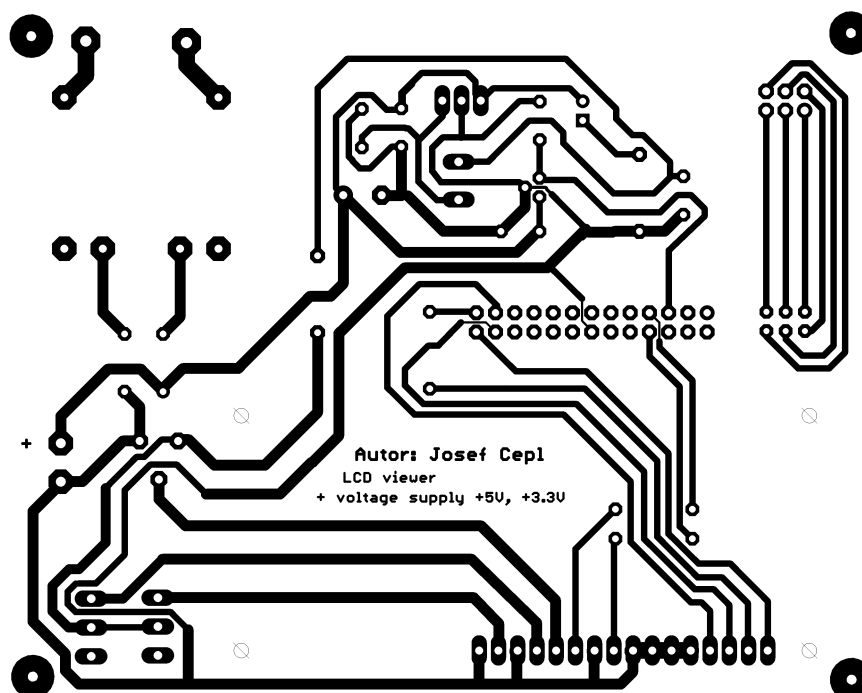
Seznam příloh

A. Výkresová dokumentace zobrazovače	66
B. Seznam součástek zobrazovače	67
C. Obsah CD	68

A. Výkresová dokumentace zobrazovače



Rozmístění součástek na DPS (Top, 1:1).



Předloha pro výrobu DPS (Bottom, 1:1).

B. Seznam součástek zobrazovače

Exported from Board.sch at 7.5.2010 10:52:08

EAGLE Version 5.6.0 Copyright (c) 1988-2009 CadSoft

Part	Value	Device	Package	Library
B1	DB107	B-DIL	B-DIL	rectifier
C1	1mF	CPOL-EUE5-8.5	E5-8,5	rc1
C2	100n	C-EU050-025X075	C050-025X075	rc1
C3	100n	C-EU050-025X075	C050-025X075	rc1
C4	100n	C-EU050-025X075	C050-025X075	rc1
C5	100n	C-EU050-025X075	C050-025X075	rc1
C6	100n	C-EU050-025X075	C050-025X075	rc1
CON1	FE 3-2	FE03-2	FE03-2	con-1sta
D1	LED_5	LED_5	LED_5	#PaJa_21
IC1	7805 stab.	78XXS	78XXS	v-reg
IC2	LP2950CZ-3.3	LP2950CZ-3.3	TO92	v-reg
K1	ARK500/2	ARK500/2	ARK500/2	#PaJa_21
L1	330uH	SD12-1000	SD12_1000	inductor-neosid
LCD1	LCD_2X16_SIL	LCD_2X16_SIL	HY-1602F	lcd_2x16_led_backlight
NAPAJENI		255SB	255SB	switch
P2	PT-6_V-LEZ	PT-6_V-LEZ	PT6V	#PaJa_21
PAD1	~	3,81/1,4	3,81/1,4	wirepad
PAD2	~	3,81/1,4	3,81/1,4	wirepad
PODSVETLENI		255SB	255SB	switch
R1	OR	R_10	R-10	#PaJa_21
R2	1,2 k	R_10	R-10	#PaJa_21
R3	OR	R-EU_0207/10	0207/10	rc1
R4	OR	R-EU_0207/10	0207/10	rc1
R5	OR	R-EU_0207/10	0207/10	rc1
SV1	FE 13-2	FE13-2	FE13-2	con-1sta
SV2	MA 3-2	MA03-2	MA03-2	con-1stb
TR1	TRHEI304-1	TRHEI304-1	TRHEI304	#PaJa_21

C. Obsah CD

/board/

Návrh desky zobrazovacího modulu v programu Eagle Layout Editor 5.6.0:

Board.sch – schéma zobrazovacího modulu.

Board.brd – návrh DPS.

/data/

Tabulky naměřených hodnot:

Namerena_data.xls – excelovský soubor obsahující všechna změřená data.

/datasheets/

Datasheety použité při konstrukci a programování:

AN3231.pdf – manuál pro obsluhu a zprovoznění SMAC aplikací.

BKWCTKUG.pdf – manuál pro použití Freescale BeeKit Wireless Connectivity Toolkit.

BSADG.pdf – manuál popisující vývoj aplikací pro ZigBee kity.

FSPRM.pdf – manuál detailně popisuje API při vývoji síťových řešení s použitím platformy Freescale.

MC1321xRM.pdf – detailní hardwarový popis vývojového kitu jehož součástí je i deska 13213 SRB.

MC1321xRM.pdf – detailní hardwarový popis pouzdra obsahujícího mikrokontrolér a transceiver.

SMACRM.pdf – detailní popis kódu založeného na architektuře SMAC.

/source/

Zdrojový kód aplikace pro vysílač i přijímač:

/Range Demo Plus RX/ – zdrojové soubory v jazyce C pro přijímací modul.

/Range Demo Plus TX/ – zdrojové soubory v jazyce C pro vysílací modul.

Diplomova_prace.bksln – projekt z programu Freescale BeeKit.

/text/

Elektronická verze práce:

Diplomova_prace_final.pdf – elektronická verze práce ve formátu pdf.

Diplomova_prace_final.doc – elektronická verze práce ve formátu doc.